Volker Deutsch / Michael Platte / Manfred Vogt

Controlul ultrasonic

Principii și aplicații industriale

Titlul în germană:
Ultraschallprüfung
Grundlagen und industrielle Anwendungen
Autori:
Volker Deutsch/Michael Platte/Manfred Vogt

Translation from the German language edition:
Ultraschallprüfung by Volker Deutsch, Michael Platte and Manfred Vogt
Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997
All Rights Reserved

Toate drepturile de publicare în România sunt rezervate Asociației Române de Examinări Nedistructive - ARoENd

2169

Traducere: Fiz. Niculae Doniga
Consultant științific: Ing. Adrian Stanciu

Publicarea în limba română a lucrării "Controlul ultrasonic - principii și aplicații industriale" se înscrie alături de apariția în anul 1996 a lucrării "Controlul fisurilor cu pulbere magnetică - principii și practică", în preocuparea Asociației Române de Examinări Nedistructive -ARoENd de a pune la dispoziția specialiștilor din România aunor materiale de certă valoare tehnică și științifică.

Lucrarea este o călăuză atât pentru specialiști cât și pentru toți cei care nu sunt specialiști în domeniul controlului nedistructiv, dar care sunt obligați să se ocupe de tehnica de control cu ultrasunete.

Ea se adresează proiectanților, constructorilor, utilizatorilor aparatului de control cu ultrasunete, cursanților și studenților care se pregătesc în domeniu.

Mulțumim pe această cale domnului Prof. Dr. Ing. Volker Deutsch pentru faptul că ne-a pus la dispoziție această valoroasă lucrare.

ARoENd

17 iunie 1998

Prefață

Această carte, ca și cea apărută în 1993 în editura VDI despre "Controlul fisurilor cu pulbere magnetică" [1], este scrisă pentru practicanții controlului. Principiile controlului ultrasonic trebuie explicate într-un limbaj limpede, așa cum este necesar în controlul practic. De aceea capitolele 2, 3 și 6 sunt voluminoase comparativ cu toate celelalte capitole ale cărții, care sunt concepute mai scurte, pentru ca volumul stabilit al lucrării să nu fie depășit. În aceste capitole sunt descrise în primul rând metodele de control folosite în fapt în perioada actuală. Trimiterile la bibliografia amănunțită și la reglementările corespunzătoare subiectului trebuie să-l ajute în continuare pe orice cititor interesat în mod special în acest domeniu. S-a renunțat în mod expres la completitudinea lucrării în sens științific și la explicarea tuturor tehnicilor de control, unele deosebit de interesante. Cartea trebuie să însoțească perfecționarea controlorului prin ultrasunete. În afară de aceasta, ea trebuie să servească drept călăuză rapidă pentru toți care nu sunt specialiști în domeniul controlului nedistructiv (CND), dar sunt obligați să se ocupe de tehnica de control cu ultrasunete, căci aceasta intervine în domeniul lor propriu de activitate. Este o situație mereu mai des întâlnită astăzi, întrucât CND este integrat în măsură din ce în ce mai mare în fabricația industrială. Principiul conform căruia calitatea nu poate fi controlată, ci doar produsă este atunci de la sine înțeles. Din această cauză CND a devenit o componentă importantă a cuprinzătoarelor sisteme de asigurare a calității (AC). Autorii - toți trei activând la firma KARL DEUTSCH, Wuppertal - au putut să elaboreze această carte bazându-se pe lucrarea "Controlul ultrasonic al îmbinărilor sudate"[2], apărută în editura DVS din Düsseldorf. Mulțumim în mod expres editurii DVS pentru înțelegerea manifestată de a permite preluarea unor părți din lucrarea amintită. În cartea de față este explicată întreaga paletă a tehnicilor de utilizare a ultrasunetelor, în plus față de tehnica corespunzătoare sudurilor.

Autorii sunt pe deplin conștienți de posibilul reproș privind faptul că figurile prezintă de preferință aparatură a casei KARL DEUTSCH. Ei pun însă în balanță faptul că au avut în cel mai simplu mod acces la aceste aparate și indică în mod expres că toate descrierile și subiectele acestei cărți sunt păstrate așa de generale, încât se potrivesc în mod egal cu toate aparatele accesibile pe piață.

Autorii mulțumesc tuturor colegilor de specialitate care i-au ajutat cu sfaturi, indicații bibliografice și le-au pus la dispoziții fotografii.

Cuprins

1 Introducere 1

1.1 Istoria controlului ultrasonic 1

1.2 Controlul nedistructiv ca parte a asigurării calității 2

2 Principii fizice 4

2.1 Metode de generare a ultrasunetelor 4

2.1.1 Generalități 4

2.1.2 Efectul piezoelectric 6

2.1.3 Magnetostricțiune 13

2.1.4 Generarea electrodinamică a ultrasunetelor 15

2.1.5 Stimularea cu laser 17

2.2 Noțiuni de teoria oscilațiilor 19

2.3 Câmpuri sonice 24

2.3.1 Noțiuni pentru caracterizarea câmpurilor sonice 24

2.3.2 Emisia sonică a suprafețelor circulare sau dreptunghiulare 25

2.3.3 Comportarea la suprafețe de separație 30

3 Principiile controlului ultrasonic 37

3.1 Palpatoare ultrasonice 37

3.1.1 Construcție și tipuri de palpatoare 37

3.1.2 Materiale oscilatoare piezoelectrice folosite la palpatoare 45

3.1.3 Utilizarea materialelor piezoelectrice în palpatoare 47

3.1.4 Cuplarea palpatoarelor 50

3.2 Aparate de control cu ultrasunete 55

3.3 Metode de control cu ultrasunete 74

3.4 Detectarea defectelor și calibrarea aparatelor 80

3.4.1 Ipoteze privind detectarea defectelor 80

3.4.2 Calibrarea distanței 87

3.4.2.1 Generalități 87

3.4.2.2 Stabilirea adâncimii defectului în cazul controlului unei suduri 91

3.4.3 Calibrarea sensibilității și descrierea defectelor 104

3.4.3.1 Generalități 104

3.4.3.2 Calibrarea AVG cu ajutorul ecourilor de fund 107
3.4.3.3. Calibrarea AVG cu ajutorul blocurilor de etaloane 114
3.4.3.4 Metoda liniilor de referință 125
3.4.3.5 Alte posibilități de descriere a defectelor 130
3.4.3.6 Descrierea computerizată a defectelor 133
3.5 Efecte datorate materialelor 146
3.6 Calificarea personalului de control 164
3.7 Controlul ultrasonic conform reglementărilor 165
3.7.1 Generalități 165
3.7.2 Reglementări cu valabilitate generală 167
3.7.3 Reglementări referitoare la obiecte 175
3.8 Raportare 202

4 Controlul manual automatizat 206

5 Controlul ultrasonic automat 214

6 Practica privind controlul ultrasonic 220
6.1 Produse laminate 220
6.1.1 Table și benzi 220
6.1.2 Țagle și bare rotunde 227
6.1.3 Șine 231
6.1.4 Țevi fără sudură 235
6.1.5 Metale neferoase 244
6.2 Îmbinări sudate 246
6.2.1 Îmbinări cap la cap 246
6.2.2 Îmbinări de colț și îmbinări ale ștuțurilor 250
6.2.3 Suduri prin presare 254
6.2.4 Țevi sudate 260
6.3 Componente pentru vehicule 269
6.4 Avioane și rachete 292
6.5 Controlul ultrasonic al instalațiilor de energie nucleară 295
6.6 Controlul îmbinărilor 298
6.7 Alte aplicații ale controlului ultrasonic 299
6.7.1 Materiale nemetalice 300
6.7.2 Butelii de gaz 302
6.7.3 Tuburi de proiectile 302
6.7.4 Valțuri 303
6.7.5 Conducte 303
6.7.6 Foraje de prospectare 305
6.7.7 Dirijarea proceselor prin ultrasunete în cazul extruziunii țevilor din material plastic 306
6.7.8 Măsurarea deschiderilor la motoarele hidraulice 307

7. Tehnica măsurătorilor prin ultrasunete 309
7.1 Măsurarea nivelului de umplere 309
7.2 Măsurarea vitezei sonice și a grosimii 310
7.3 Determinarea caracteristicilor materialelor 313

8. Controlul ultrasonic în cadrul CND 323
8.1 Radiografia cu radiații roentgen și gama 325
8.2 Metoda curenților turbionari 326
8.3 Controlul cu flux de dispersie 329
8.4 Controlul cu lichide penetrante 331
8.5 Metoda sondelor de potențial 332
8.6 Inducția magnetică 325
8.7 Analiza emisiei acustice 326
8.8 Metode termice 329
8.9 Controlul vizual 331
8.10 Controlul ultrasonic comparativ cu alte metode CND 332

9. Informații privind bibliografia și alte surse 334

10. Simboluri și prescurtări 334
10.1 Simboluri 335
10.2 Prescurtări utilizate 342

11. Index alfabetic 357

1. Introducere

1.1 Istoria controlului ultrasonic

În acest capitol sunt folosiți termeni de specialitate care nu sunt încă familiari începătorilor în probleme de tehnică de control ultrasonic. Se recomandă în acest caz ca acest capitol să fie la început omis și de abia mai târziu să fie citit.

Principiile generării ultrasunetelor au fost descrise de către fizicieni renumiți încă din a doua jumătate a secolului 19. J. P. Joule a descoperit în 1847 efectul magnetostrictiv, iar frații J. și P. Curie în 1880 efectul piezoelectric. Prima aplicație practică este propusă de englezul Richardson. În 1912 s-a scufundat "Titanicul" și lumea tehnică discuta despre recunoașterea din timp a ghețarilor. Propunerea lui Richardson de a încerca aceasta cu ultrasunete a condus la consecințe de abia când Chilowsky și Langevin au început să folosească ultrasunetele în cursul primului război mondial pentru localizarea submarinelor. Această tehnică de localizare a fost perfecționată în anii dintre cele două războaie mondiale în vederea descrierii topologiei marine.

Rusul Sokolov a propus în 1928 pentru prima oară introducerea ultrasunetelor în controlul materialelor. De amintit sunt și lucrările lui Pohlman, care vizualizează în 1937 câmpurile ultrasonice prin folosirea unui tub video-captor umplut cu plăcuțe subțiri de metal. În timpul celui de al doilea război mondial, controlul ultrasonic a fost introdus, între anii 1940 și 1943, în SUA, Germania și Anglia de către Firestone, Trost și Sproule, bineînțeles fără a avea cunoștință între ei despre aceasta, pentru rezolvarea unor probleme similare de control. Au fost detectate stratificări în plăcile tancurilor și retasuri fine în țagle cu metode nedistructive necunoscute până atunci. În vreme ce Trost a lucrat cu emițător și receptor separați, ca la metoda radiografică prin transmisie, fapt ce a condus la așa-numitul "clește ultrasonic Trost", Firestone a inventat metoda de viitor, prin reflexie cu un singur traductor. "Reflectoscopul" său a fost perfecționat în perioada următoare în vederea folosirii practice de către firma Sperry, mai târziu Automation Industries. Sproule a lucrat nu numai la început, ci și mai târziu în exclusivitate cu palpatoare emisie-recepție (S-E). Aparatul său a fost confecționat la firma Hughes, mai târziu Kevin Hughes. Dezvoltarea aparaturii în Germania nu s-a oprit la activitatea lui Trost la "Institutul Roentgen al Reichului". Nu doar J. Krautkrämer, ci și K. Deutsch, acesta împreună cu H. W. Brandscheid, au început operațiile de dezvoltare a aparaturii, fără a ști unul despre celălalt, dar cunoscând lucrările lui

Firestone. Odată cu reconstrucția industriei europene a oțelului a rezultat în anii ce au urmat un mare potențial de piață, încât dezvoltarea în domeniul aparaturii a părut profitabilă și pentru alte firme (Siemens, Lehfeldt, Kretztechnik). Impetuoasa dezvoltare ulterioară ce a urmat în toate metodele CND durează încă și astăzi.

1.2. Controlul nedistructiv ca parte a asigurării calității.

Orice control sau verificare a pieselor trebuie să lămurească dacă obiectele examinate vor fi capabile să suporte fără a se defecta solicitările viitoare din timpul funcționării.

Controalele distructive furnizează în acest sens valori comparative, presupun însă similaritate cu piesele nesupuse verificării, căci doar în acest caz este admis transferul rezultatelor. Este evident că verificările distructive sunt aplicate pe cel mai mic număr posibil de obiecte. Doar controalele nedistructive (CND) pot fi aplicate fără excepție tuturor pieselor. Cu ajutorul lor se pot determina nu doar caracteristicile materialelor, ci se pot detecta și evalua zone defecte care apar sporadic. După descoperirea neomogenităților, este important să se știe în ce măsură acestea pot sau chiar trebuie să fie tolerate. Este cazul reparațiilor, de la care nu se poate aștepta doar o îmbunătățire a capabilității de utilizare. Din această afirmație se poate defini astfel sarcina CND:

> Printr-o tehnică de control reproductibilă se stabilește cu certitudine că piesele considerate după control apte de a fi utilizate nu prezintă nici un fel de defecte care depășesc un prag de evaluare definit prealabil. Rezultatul trebuie astfel documentat încât să nu existe nici un fel de îndoială în raportul dintre piesa controlată și rezultatul controlului.

Țelul propriu-zis al CND este prin urmare să ofere spre utilizare practică doar acele piese controlate care ating sau depășesc o calitate minimă definită. Prin aceasta CND este o parte componentă stabilă a asigurării calității (AC), recent desemnată drept managementul calității (MC), dar numai una din multiplele părți ale acesteia. Din această cauză la sfârșit și multlăudatul rol al controlului materialelor ca parte a inspecției situată deasupra producției. În special normele de calitate recunoscute internațional ca DIN / ISO 9000 și următoarele pretind o dirijare a proceselor prin care respectiva calitate este produsă, nu verificată. Prin modificarea sarcinii controlului, problema reproductibilității metodelor de control câștigă o poziție însemnată. Siguranța de stabilire reproductibilă a zonelor cu defecte sau a celor fără defecte poate fi foarte ridicată. Pentru aceasta trebuie luate în considerație deficiențele sistematice în cadrul metodelor folosite, astfel ca să fie excluse variațiilor rezultatelor provocate de caracteristicile pieselor controlate sau de condițiile de control, datorate influenței mediului înconjurător, a aparaturii de control defecte sau a insuficiențelor umane. Dacă se aplică metoda de control doar atunci când poate fi așteptat un rezultat sigur, dacă se controlează că sunt prezente caracteristici similare ale pieselor și condiții constante de control și dacă sunt împiedicate efectele mediului înconjurător, atunci rezultatele defectuoase ale controlului pot apare doar din cauza aparaturii defecte sau a atitudinii eronate a controlorului. Caracteristicile aparatelor și ale accesorilor sunt prescrise astăzi în limite strânse, iar respectarea lor este cuprinsă și documentată în sistemele AC. Cea mai voluminoasă sursă de erori o reprezintă personalul de execuție căci "Nimeni nu este perfect". Pe de altă parte, această sursă de erori poate fi substanțial redusă prin alegerea corectă a personalului, prin pregătirea și perfecționarea acestuia, ca și printr-o motivație adecvată, însă

nu poate fi complet eliminată. În sfârșit, trebuie să se decidă în fiecare caz în parte prin ce mijloace poate fi redus riscul rămas și dacă cheltuielile legate de aceasta sunt justificate economic. De asemenea trebuie meditat dacă acest risc rămas ar putea fi acoperit printr-o asigurare de responsabilitate. În legătură cu această problemă, precizăm că și prestarea de servicii, ca de exemplu controalele, se supun legii privind garanția producătorului.

Asigurarea calității în procesul modern de fabricație nu poate avea loc fără luarea în considerație a costurilor. Piesele care, din cauza cheltuielilor prea ridicate pentru control, devin prea scumpe, își pierd capacitatea de concurență. Cei care cumpără sau prelucrează o piesă componentă trebuie să insiste bineînțeles asupra calității, ei o garantează însă doar indirect, pot să impună totuși furnizorilor prejudicii ulterioare. Cât timp cumpărătorilor nu li se reproșează nimic atunci când solicită un anumit nivel de calitate, atunci se lasă în mod preponderent în seama furnizorilor ca aceștia să asigure nivelul de calitate și înainte de toate să o ofere la un preț meritat. De altfel există multe exemple care arată că prin optimizarea proceselor de fabricație se pot reduce substanțial și cheltuielile cauzate de control.

În cazul controlului ultrasonic manual, cheltuielile de personal depășesc de câteva ori valoarea corespunzătoare aparaturii și accesoriile. Acest fapt se poate dovedi printr-un calcul aproximativ simplu: locul de muncă al unui controlor de nivel 2 în ultrasunete costă cel puțin 75.000 DM anual. Un aparat ultrasonic cu accesoriile necesare poate fi procurat cu mai puțin de 15.000 DM. El poate fi folosit de 2 controlori în 2 schimburi, minim 5 ani, de cele mai multe ori un timp mai îndelungat. Se ajunge astfel ușor la concluzia că pentru personal, costurile reprezintă mai mult de 95% din costurile totale. În cazul în care este folosit personal ajutător pentru pregătirea controlului ca și pentru completarea și clasificarea buletinelor de control, valoarea aceasta devine și mai mare. Se poate demonstra astfel că și un aparat substanțial mai scump este rentabil atunci când timpii pentru calibrare și înscriere a rezultatelor pot fi reduși. Această constatare poate fi realizată acum cu ajutorul aparatelor moderne prevăzute cu calculator și prin conectarea la un sistem electronic de prelucrare a datelor (EDV)

Din înregistrarea anuală a uzurii aparatelor și din orele efective de control se pot determina cheltuielile pe fiecare piesă cauzate de etapele de control. Provoacă mereu mirare faptul că aceste cheltuieli reale de control astfel stabilite se găsesc în întregime în ordinul de mărime al costurilor de fabricație, câteodată chiar depășindu-le. Acest fapt este cu atât mai valabil cu cât prelucrarea ulterioară este mai laborioasă și deci și verificările suplimentare se aplică în cantitate mai mare.

Se ajunge astfel ca uneori chiar la producția de serie mică să fie rentabilă utilizarea aparatelor automatizate, bineînțeles mai scumpe. În astfel de situații trebuie luați în considerație timpii necesari schimbării dotării și probele la care se supun noile instalații. În cazul controlului de serie, de exemplu la controlul țaglelor pe fluxul de fabricație, supravegherea automată continuă în mai multe schimburi este substanțial mai economică decât utilizarea controlului manual cu mai mulți controlori. Nimeni nu contestă că siguranța de detectare a tuturor defectelor este mult mai ridicată în cazul unei instalații automate decât în cazul unui control manual.

Dacă metodele CND se aplică în cadrul AC, atunci trebuie ca instrucțiunile clare de lucru să fie parte componentă a manualului de asigurarea calității (MAC). În aceste instrucțiuni trebuie arătat fără dubiu cum se vor deosebi piesele bune de cele defecte, cum sunt marcate acestea și în ce formă trebuie descrise și documentate semnele de calitate.

2. Principii fizice

2.1 Metode de generare a ultrasunetelor

2.1.1 Generalități

Sunetul reprezintă o mișcare mecanică a materiei. Fără materie nu are loc propagarea sunetelor. Un clopot lovit aflat într-un recipient vidat nu poate fi auzit în exterior. Umplând recipientul cu aer sau cu un alt gaz, tonul clopotului care vibrează devine perceptibil. Sunetele iau naștere și se propagă nu numai în gaze și fluide, ci și în corpurile solide. În această situație nu este transportată materia, ci are loc o oscilație a atomilor sau moleculelor ce compun mediul de propagare în jurul unei poziții de echilibru, care transmite mișcarea atomilor sau moleculelor învecinate. Astfel oscilația se propagă cu o *viteză sonică* c, a cărei valoare este caracteristică mediului de propagare. Analizând o imagine instantanee a oscilațiilor moleculelor unei unde sonice în propagare, se observă că starea de oscilație se repetă la o distanță bine definită. Această distanță este denumită *lungime de undă* λ. În schimb într-un punct fix de observare starea de oscilație se repetă în timp. *Frecvența* f este numărul de oscilații pe secundă și se exprimă în herți (Hz), după numele fizicianului german Hertz.Lungimea de undă și frecvența sunt legate între ele prin viteza sonică:

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad (2\text{-}1)$$

Frecvențele sunetelor folosite în tehnică cuprind câteva ordine de mărime. De aceea sunt practice și utilizabile valorile în kiloherți (1KHz=10^3Hz) și megaherți (1MHz= 10^6Hz).

Cel mai frecvent și mai mult cercetată este propagarea sunetelor în aer, prin care noi oamenii ne înțelegem între noi. Definiția *ultrasunetelor* se raportează de aceea subiectiv la capacitatea auditivă a oamenilor. Pentru o ureche umană sănătoasă sunt perceptibile frecvențe până la cca 18 KHz, această limită scăzând o dată cu creșterea vârstei. Din punct de vedere fizic, ultrasunetele sunt sunete ale căror frecvențe se găsesc peste limita audibilă pentru om (>20KHz). Pentru completitudine să amintim că urechea omenească prezintă o valoare limită și la frecvențe scăzute: sunetele cu frecvența mai mică de 16 Hz. care nu mai sunt percepute de oameni sunt numite *infrasunete*.

Alte viețuitoare, de exemplu câinii sau unele mamifere mai mici, se află în situația de a percepe ultrasunetele. În plus unele din ele pot să și genereze semnale ultrasonice.

Exemplul cel mai cunoscut îl reprezintă liliecii, care localizează în întuneric obstacole sau animale de pradă cu ajutorul ecourilor ultrasonice de la 20 la 150 KHz, o metodă al cărei principiu este în întregime asemănător celui din aplicațiile din domeniul controlului materialelor, descrisă în această lucrare în capitolele următoare.

În cazul multor procese tehnice, pe lângă zgomotele audibile se produc și cantități importante de semnale ultrasonice, de exemplu în cazul funcționării sirenelor cu aburi sau în cursul proceselor de șlefuire. Și zgomotele mașinilor conțin adesea ultrasunete. Dacă dorim generarea ultrasunetelor de o anumită frecvență, trebuie să ne folosim de mijloace tehnice de ajutor adecvate. Cel mai simplu are loc acest fenomen atunci când este posibil ca metodele cunoscute de producere a sunetelor audibile să fie transpuse la domeniul ultrasonic. Un exemplu intuitiv îl prezintă tubul de orgă, a cărui frecvență fundamentală este în mod cunoscut cu atât mai înaltă, cu cât este mai redusă coloana sa rezonantă. Dimensiunea necesară unei anumite frecvențe este determinată de lungimea de undă. Cunoscutul fluier pentru câini funcționează de asemenea după acest principiu: ca urmare a dimensiunilor reduse ale coloanei de rezonanță, se pot genera în aer fluierături cu frecvențe ultrasonice până la 30 KHz.

Dacă se dorește totuși generarea unor sunete cu o distribuție de semnal dinainte stabilită, similar situației de la redarea vorbirii din domeniul audibil, atunci sunt necesare suprafețe emițătoare, care să producă prin mișcarea lor, deplasarea materiei înconjurătoare, sub forma unor oscilații într-un mod prestabilit. În cazul difuzoarelor pentru sunete transmise prin aer, membranele subțiri din hârtie sau material plastic sunt antrenate prin forțe electrostatice, sub forma unor sisteme de bobine electromagnetice sau ca oscilatoare capacitive, similare din punct de vedere constructiv condensatorilor electrici cu plăci. În cazul confecțiilor miniaturizate se pot stimula în aer unde sonice cu frecvențe până la 1MHz și invers, se pot detecta astfel de unde. La frecvențe mai înalte inerția părților mecanice folosite este totuși prea mare. Principiul este complet nefuncțional în situația generării ultrasunetelor în lichide sau solide, deoarece, chiar la frecvențe joase, suprafața emițătoare ar fi prea puternic solicitată, din cauza densității ridicate a mediului de propagare. Folosind caracteristici fizice speciale, unele solide pot fi stimulate pentru a oscila singure, iar aceste oscilații pot fi ușor transmise într-un corp solid sau într-un fluid. În acest mod se pot genera și detecta ultrasunete în domeniul de frecvență utilizat în controlul materialelor de la 20 KHz la peste 100 MHz. Pentru controlul materialelor se utilizează în principiu ultrasunete de mică intensitate, cu putere de câțiva miliwați, care nu produc nici un fel de modificări permanente în mediul de propagare. În contrast cu această situație se găsește utilizarea ultrasunetelor de mare intensitate la sudare, găurire sau curățire, al cărei scop este modificarea voită a materialelor. În cele ce urmează se vor explica principiile fizice folosite în controlul materialelor pentru producerea ultrasunetelor de mică intensitate.

2.1.2 Efectul piezoelectric

Dacă se exercită asupra anumitor solide o solicitare la tracțiune sau la compresiune, pe suprafețe apar sarcini electrice, care pot fi detectate ca diferență de tensiune dacă suprafețele au fost în prealabil metalizate, iar cei doi electrozi constituie un condesator cu plăci (fig. 2.1.a). Dacă solicitarea și deformarea se modifică, atunci se modifică în mod corespunzător și tensiunea. Fenomenul este denumit *efect piezoelectric*. Materialele care prezintă acest fenomen sunt numite piezoelectrice. Fenomenul este reversibil: la aplicarea unei tensiune exterioare, solidul se contractă, respectiv se dilată (fig. 2.1b). Fenomenul poartă numele de efect piezoelectric invers sau reciproc. În sfârșit, dacă se aplică o tensiune alternativă, atunci cristalul își modifică grosimea în același ritm, el oscilează. Variațiile grosimii datorate acestui proces sunt mici și nu sunt perceptibile cu ochiul liber. La fel ca în cazul diapazonului, există frecvențe privilegiate în procesul de generare. Așa numita frecvență de rezonanță f_r a unui disc piezoelectric rezultă din condiția ca grosimea lui, d, să corespundă unei jumătăți de lungime de undă, deci:

$$f_r = \frac{c}{2d} \qquad (2\text{-}2)$$

Cauza piezoelectricității se găsește în larg răspândita asimetrie a formei constructive a cristalelor. De aici rezultă că majoritatea solidelor din natură sunt piezoelectrice, până și lemnul, zahărul de trestie de zahăr și oasele ființelor umane. Totuți doar la foarte puține solide, piezoelectricitatea este suficient de reliefată încât să poată fi folosită tehnic. Cel mai vechi material piezoelectric utilizat în tehnică este cuarțul, care se găsește în natură sub formă de cristal de stâncă, dar poate fi și crescut tehnic. De la el se trage de altfel obișnuința controlorilor de a numi în mod eronat cristale sau cuarțuri toate elementele piezoelectrice.

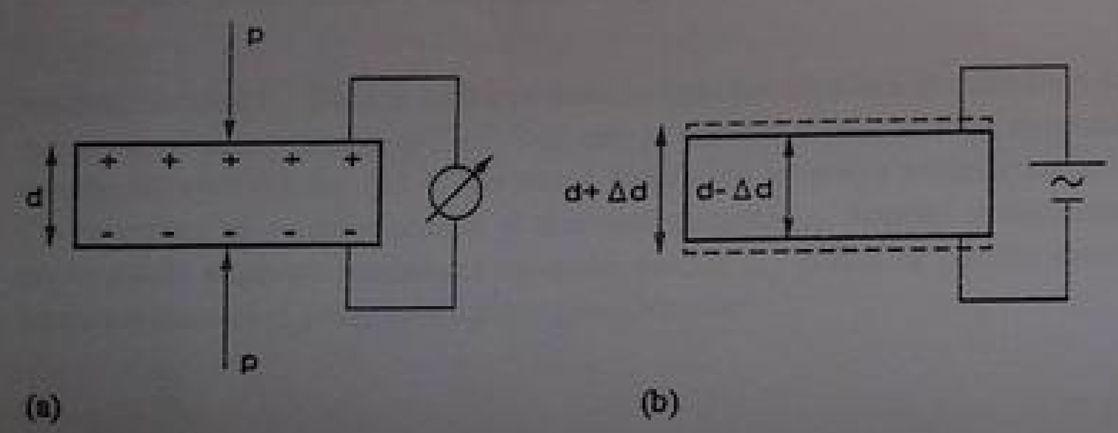


Fig. 2-1 Efectul piezoelectric direct și invers

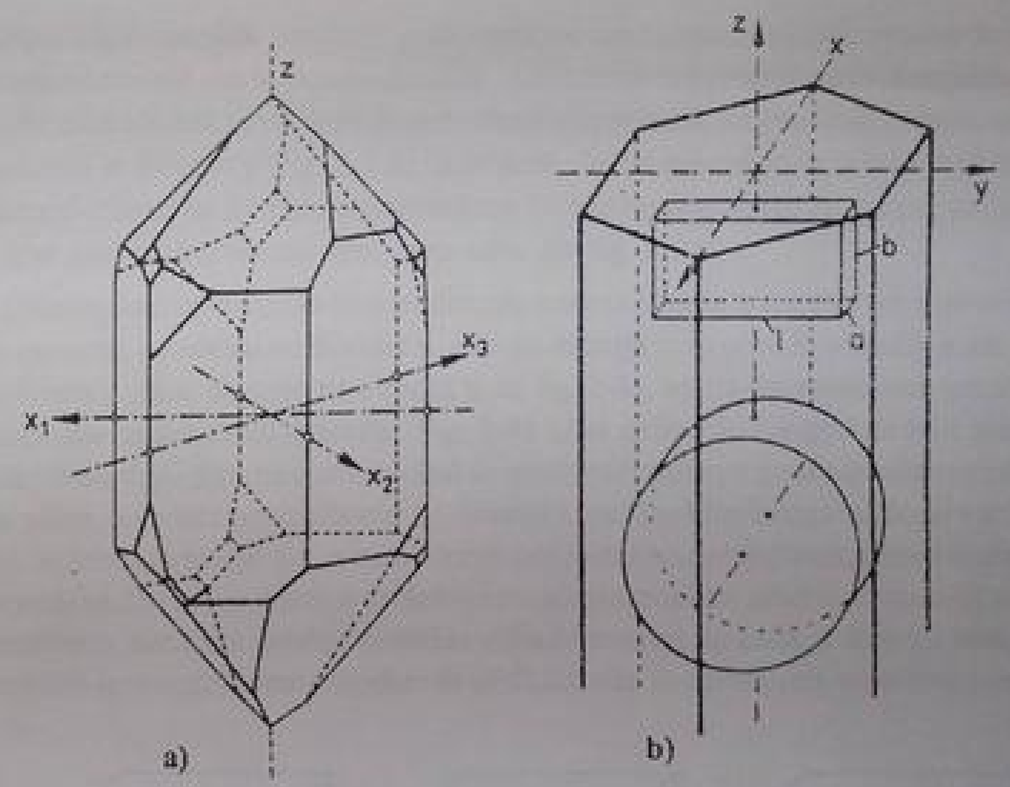


Fig. 2-2 Cuarțul (după [3])

a) forma cristalului

b) poziția tăieturii în cazul discurilor și barelor

Cuarțul (SiO_2) constă din punct de vedere chimic dintr-un ion de siliciu încărcat pozitiv (Si^{4+}) și doi ioni de oxigen încărcați negativ (O^{2-}). La formarea cristalelor, cele două componente se așază intercalat în poziții periodice, ca urmare a forțelor de legătură. Forma cristalului de cuarț [3] prezentă în figura 2-2 a este caracterizată de 3 axe cristalografice x, y, z, care formează un sistem rectangular de coordonate (fig. 2-2 b). Proprietățile mecanice, optice și piezoelectrice depind puternic de direcția respectivă în cristal. Astfel, pe direcția z nu se manifestă efectul piezoelectric, care însă apare complet pe o direcție perpendiculară pe aceasta. De aceea, pentru utilizarea efectului piezoelectric, se taie din cristal discuri sau bare, fie perpendicular pe axa x (tăietură X, fig. 2-2 b), fie perpendicular pe axa y (tăietură Y). Fig. 2-3 prezintă schematic poziția în planul z a centrelor de greutate ale sarcinilor pozitive și negative în cazul unei plăci de cuarț metalizate, tăiate perpendicular pe axa x. În lipsa unei solicitări mecanice (fig. 2-3 a), centrele de greutate ale sarcinilor atomilor încărcați pozitiv și negativ coincid. Efectul de influență prin inducție a sarcinilor electrice asupra suprafețelor metalizate ale plăcilor se compensează. Placa piezoelectrică este de aceea neîncărcată electric. În cazul aplicării unei presiuni p în direcția x (fig. 2-3 b), rețeaua cristalină este astfel comprimată încât ionii pozitivi ai electrodului inferior se apropie de ionii negativi ai electrodului superior, iar acesta se încarcă corespunzător. Între electrozi se poate colecta deci o

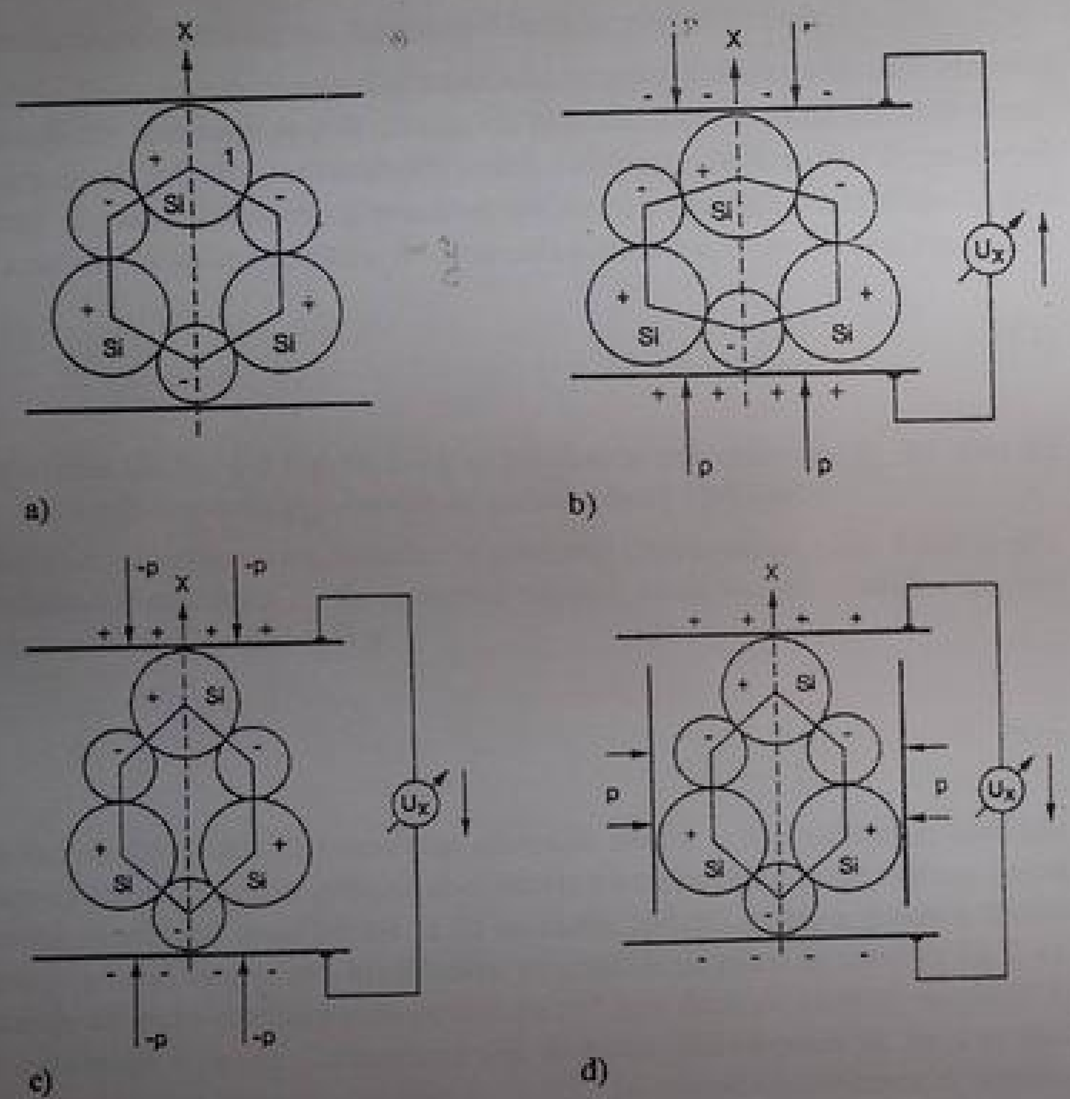


Fig. 2-3 Apariția piezoelectricității în cuarț (tăietură X) (după [3])

tensiune electrică U_x. Dacă se aplică pe ambele suprafețe ale plăcii de cuarț forțe de sens opus, prin subpresiune, -p (fig 2-3 c), apar pe electrozi sarcini electrice cu semne inverse situației din fig. 2-3 b, din cauza deformării inverse a rețelei cristaline. Corespunzător își modifică semnul și tensiunea electrică U_x. Aceleași considerente sunt valabile și pentru intensitatea câmpului electric E_x, definit ca raportul dintre tensiunea electrică și grosimea d a plăcii piezoelectrice:

$$E_x = \frac{U_x}{d} \qquad (2\text{-}3)$$

Direcția intensității câmpului electric este întotdeauna de la (+) la (-).

Atunci când direcțiile presiunii și ale tensiunii sau câmpului electric produs de efecul presiunii coincid - ca în situația dinainte - sau într-un caz general, când direcțiile cauzei și efectului coincid, se vorbește despre efectul piezoelectric longitudinal. În cazul acțiunii presiunii în direcția y (fig. 2-3 d), ia naștere efectul piezoelectric transversal, la care cauza și efectul au direcții perpendiculare. Pe electrozii orientați tot paralel cu direcția x apar sarcini electrice cu semn opus celor din fig. 2-3 b.

Aplicarea unei tensiuni electrice pe direcția x are ca urmare în mod invers o modificare de grosime, nu numai pe direcția x, ci și pe direcția y. În plus, în planul y-z are loc o forfecare a plăcii de cuarț pe direcția y. În fig. 2-4a, aceste fenomene sunt prezentate schematic pentru cazul cuarțului. Fig. 2-4b arată deformările suportate de o placă de cuarț tăiată după direcția y atunci când se aplică o tensiune pe două suprafețe metalizate ale plăcii, orientate perpendicular pe direcția y: pe lângă forfecarea în planul x-z apare și o forfecare în planul x-y, la care suprafețele metalizate se deplasează practic una față de cealaltă. Diferitele procese de deformare ale materialelor piezoelectrice sunt adesea deranjante, deoarece produc simultan diferite moduri de undă și sunt de asemenea sensibile la recepția acestor moduri de undă diferite. Reciproc, prin acest fenomen este

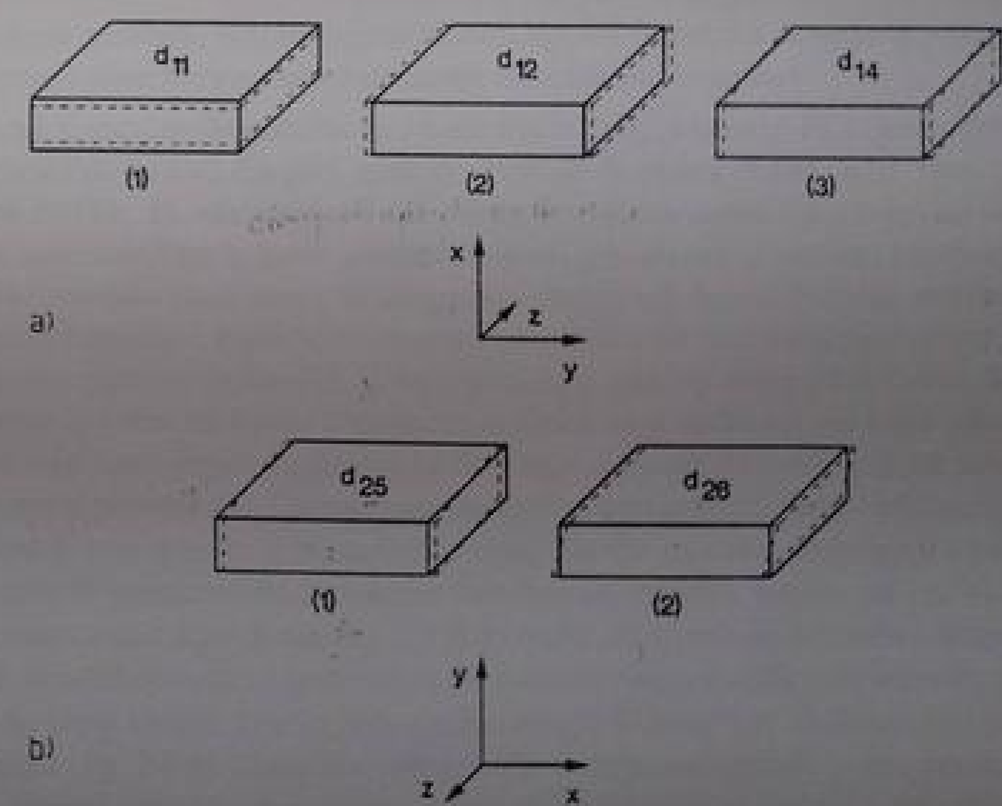


Fig. 2-4 Modificarea dimensiunilor în cuarț (tăietură X) (după [3])
a) tăietură X la tensiunea electrică în direcția X
b) tăietură Y la tensiunea electrică în direcția Y

înlesnită tehnic stimularea sau detectarea diferitelor moduri de unde.

Relațiile dependente de direcție dintre mărimile mecanice și electrice în cadrul efectului piezoelectric sunt descrise prin constantele piezoelectrice. În cazul efectului piezoelectric direct, hotărâtor pentru recepția sonică, constanta g_{ij} redă raportul dintre câmpul electric E generat în material și presiunea exterioară p necesară. Toate mărimile sunt indicate prin direcțiile respective, folosind cifre pentru axe, respectiv 1=x, 2=y și 3=z:

$$g_{ij}=\frac{E_i}{P_j} \qquad (2\text{-}4)$$

Raporturile din fig. 2-3 b și fig.2-3 c se pot descrie prin constanta g_{11}, iar cele din fig. 2-3 d prin constanta g_{12}. Ambele au valoarea de $57\cdot10^{-3}$[Vm/N].

Efectul piezoelectric invers, hotărâtor la generarea ultrasunetelor, poate fi descris prin constanta piezoelectrică d_{ij}. Ea reprezintă raportul dintre variația relativă a lungimii S=Δs/s și câmpul electric aplicat:

$$d_{ij}=\frac{S_j}{E_i} \qquad (2\text{-}5)$$

De aici rezultă evident că intensitatea câmpului electric și nu tensiunea aplicată este decisivă pentru alungirea generată unei lamele piezoelectrice. Cu cât este mai groasă lamela, cu atât mai mare trebuie să fie tensiunea aplicată pentru a genera o aceeași variație relativă de grosime. Modificările de grosime ale plăcii de cuarț din fig. 2-4a, datorate câmpului electric aplicat pe direcția x=1 sunt descrise, conform relației (2-5) de constantele d_{11} și d_{12}. Deformările prin forfecare din planurile yz, zx și xy sunt caracterizate prin alungirile relative S_4, S_5, S_6. În consecință constanta d_{14} descrie forfecarea plăcii de cuarț din fig. 2-4 a cu câmpul în direcția y.

Constantele piezoelectrice d_{ij} pentru cuarț au valorile [5]:

$$d_{11}=-d_{12}=-d_{26}=2{,}25\cdot10^{-12}[\mathrm{m/V}]$$

$$d_{14}=-d_{25}=-0{,}85\cdot10^{-12}[\mathrm{m/V}]$$

O lamelă din cuarț cu grosimea de 1 mm ar suferi prin urmare la o tensiune de excitare de 1000 V doar o variație de grosime de 2miimi de micron, adică 2nm.

Constantele piezoelectrice ale cuarțului sunt în mod larg independente de temperatură. Totuși, deasupra temperaturii de 573°C, cuarțul își pierde proprietățile piezoelectrice, întrucât în această situație ia naștere o formă nepiezoelectrică a cristalelor.

Prin efectul piezoelectric, energia mecanică este transformată în energia electrică. Ca în toate transformările dintr-o formă de energie în alta, și în acest caz poate fi definit randamentul procesului. O măsură a acestuia este *factorul de cuplare electromecanică, k*. Acesta este strâns legat de raportul dintre energia mecanică produsă în materialul piezoelectric și energia electrică totală, ca și de raportul invers. Factorul de cuplare nu poate fi niciodată egal sau mai mare decât unitatea. Deoarece doar energia înmagazinată în formă mecanică poate fi tot mecanic cedată în procent maxim, un material piezoelectric este cu atât mai adecvat pentru producerea sunetelor cu cât factorul de cuplare este mai mare. Aceeași afirmație este valabilă pentru direcția contrară de transformare a energiei la recepția sunetului de către materialul piezoelectric. Factorul de cuplare electromagnetică este foarte potrivit de asemenea pentru a compara între ele diferite materiale piezoelectrice din punct de vedere al randamentului. El poate fi calculat din constantele piezoelectrice și din caracteristicile mecanice. Deoarece factorul de cuplare electromagnetică, ca și constantele piezoelectrice, este dependent de direcție, el este desemnat în același mod cu constantele. Deci oscilația grosimii unei plăci de cuarț cu tăietură X este descrisă prin k_{11}, oscilația transversală prin k_{12}, iar oscilația de forfecare prin k_{14}. Prima cifră indică direcția tăieturii, respectiv direcția tensiunii electrice prezente, iar cea de a doua cifră desemnează deformarea mecanică observată. În cazul cuarțului, valorile corespunzătoare sunt $k_{11}=k_{12}=0{,}1$ și $k_{14}=0{,}026$[6].

În actuala perioadă, ceramicile mixte feroelectrice reprezintă de departe cele mai importante materiale piezoelectrice pentru toate tipurile de senzori.

În cazul titanatului-zirconatului de plumb $Pb(ZrTi)O_3$, prescurtat PZT, acesta este o soluție solidă formată din părți egale de zirconat de plumb $PbZrO_3$ și de titanat de plumb $PbTiO_3$. Ea este preparată sub formă de pulbere, căreia i se adaugă un liant fluid, apoi este adusă în forma geometrică dorită prin presare și coacere (sinterizare). Similar structurii materialelor feromagnetice care conțin regiuni Weiss cu polarizare magnetică spontană, materialele feroelectrice constau din mici domenii cristaline, cu polarizare electrică spontană[5,7]. Ionii pozitivi și negativi sunt deplasați de la locul lor chiar în starea de repaus a amestecului. Orice forță exterioară sau câmp electric poate mări sau micșora deplasarea ionilor. Așadar fiecare domeniu singular este în principiu și piezoelectric. Deasupra așa-numitei temperaturi Curie polarizarea spontană dispare și prin aceasta și piezoelectricitatea. Similar cu cazul feromagnetismului, direcțiile de polarizare ale domeniilor feroelectrice conținute într-un cub sau într-un disc sunt complet dezordonate (fig. 2-5 a). În medie, orice porțiune extrasă la întâmplare dintr-un astfel de material apare neutră din punct de vedere electric și nepiezoelectrică. Într-un câmp electric exterior puternic E, direcțiile de polarizare ale domeniilor pot fi orientate (fig. 2-5 b). Materialul obține astfel direcția preferențială și este piezoelectric. Direcția câmpului de polarizare este de regulă stabilită ca direcție z și notată prin indicele 3. Pentru a realiza un efect piezoelectric puternic este necesar ca alinierea să fie cât mai constantă posibil. Pentru acest scop, în cadrul unui proces de polarizare,

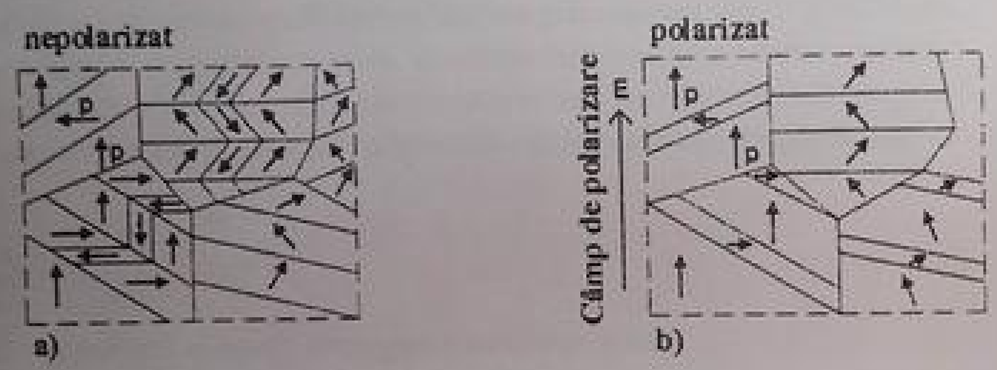


Fig. 2-5 Orientarea polarizării în cristalele mixte feroelectrice (piezoelectrice) [7]

materialul este încălzit la o temperatură ce depășește temperatura Curie și apoi răcit lent, după ce i s-a aplicat un câmp electric intens. În acest mod sunt posibili pentru PZT factori de cuplare electromecanică foarte ridicați (k_{33} până la 0,7).

În sens strict, k_{33} descrie oscilația unei bare lungi în direcția de polarizare (fig 2-6 a). Totuși, de cele mai multe ori, interes practic prezintă plăcuțele subțiri de formă circulară sau dreptunghiulară. În aceste cazuri piezoelectricitatea dependentă de direcție și geometria specială dau naștere la modificări dimensionale, care pot fi interpretate ca oscilații de grosime (fig. 2-6 b) și ca oscilații radiale sau chiar planare (fig. 2-6 c). În plus, ele depind și de proprietățile elastice ale materialului și deci sunt descrise prin factorii de cuplare aferenți pentru oscilații de grosime, k_t, respectiv oscilații planare, k_p.

Tensiunile electrice alternative aplicate pentru generarea sunetelor la piezoceramici sau în general la orice material care devine piezoelectric printr-un proces de polarizare, pot distruge piezoelectricitatea dacă intensitățile de câmp în material sunt prea ridicate. În cazul piezoceramicilor, evenimentul se poate produce și ca urmare a unei prea ridicate presiuni statice sau mecanice variabile. În plus, piezoceramicile sunt afectate de îmbătrânirea naturală, când piezoelectricitatea scade exponențial cu timpul, din cauza

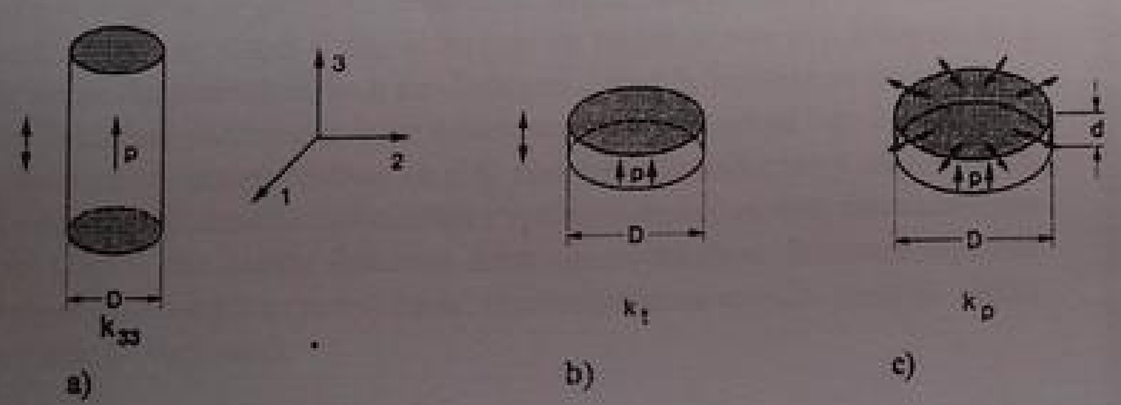


Fig. 2-6 Forme de oscilație ale corpurilor piezoelectrice și factorii de cuplare aferenți

salturilor dipolilor domeniilor singulare. Folosind componente suplimentare de stabilizare , se poate reduce scăderea într-o scară logaritmică de timp până sub 0,2% în 10 ani. Folosind un proces artificial de îmbătrânire, se constată pentru piezoceramicile folosite în prezent o scădere a piezoelectricității de mai puțin de 0,2% într-o decadă, practic nedetectabilă. În general, prin modificări ale compoziției chimice, proprietățile piezoceramicilor pot fi în mod voit modificate în limite largi.

Pentru generarea ultrasunetelor, piezoceramicile utilizate în vremurile dinainte (titanatul de bariu) ca și cuarțul descris mai înainte au fost înlocuite prin ceramici mixte, cu randament mai mare. Același lucru este valabil de altfel și pentru sarea Seignette cristalină și pentru bifosfatul de potasiu (KDP). Din materialele cristaline existente, o oarecare importanță tehnică o prezintă doar niobatul de litiu ($LiNbO_3$), feroelectric, datorită stabilității sale ridicate la temperatură (până la 1200°C). Sulfatul de litiu este puternic higroscopic - astfel este denumită tendința de a absorbi apa - și este de aceea mai puțin folosit.

Materialele plastice piezoelectrice capătă o însemnătate din ce în ce mai mare. Ele nu posedă piezoelectricitate naturală. Sub forma unor folii subțiri, ele devin piezoelectrice printr-un proces de polarizare, similar celui folosit pentru piezoceramici. Astfel sunt ordonate momentele dipolilor lanțurilor de molecule cu ajutorul unui câmp electric puternic de polarizare sau se produc spații încărcate. Acestea sunt straturi cu purtători de sarcină legați. Și în această situație cauzele fizice ale piezoelectricității sunt cele care, la deplasarea sarcinilor prin forțe mecanice exterioare sau invers, determină acțiunea forței câmpului electric asupra dipolului sau purtătorului de sarcină, respectiv o modificare de grosime sau lungime.

2.1.3 Magnetostricțiune

Dacă se așază un material feromagnetic într-un câmp magnetic, lungimea acestuia se modifică. Efectul poartă denumirea de magnetostricțiune. Bara feromagnetică înconjurată de bobină din fig. 2-7 suferă deci o modificare a lungimii atunci când bobina este străbătută de un curent electric I. Efectul este reciproc. Dacă o bară

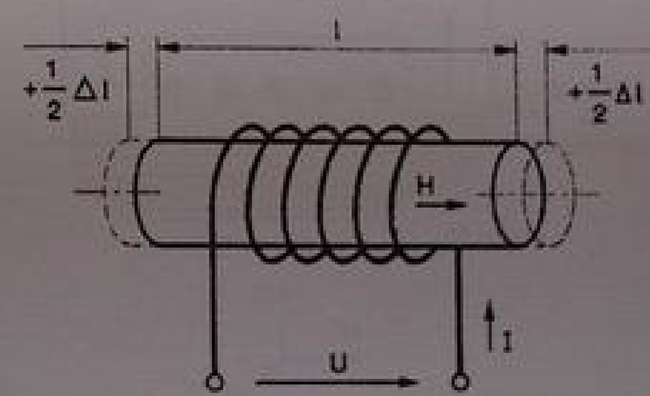


Fig. 2-7 Principiul magnetostricțiunii [8]

feromagnetică este supusă unei modificări de lungime prin acțiunea unei forțe exterioare, atunci se modifică și magnetizarea barei. În bobina care înconjoară bara ia naștere o tensiune de inducție U. Similar plăcii piezoelectrice, bara feromagnetică de lungime l posedă și ea o frecvență de rezonanță f_r, când semilungimea de undă corespunde lungimii barei:

$$f_r = \frac{c}{2l} \tag{2-6}$$

În formulă c reprezintă viteza de propagare a sunetului în bară.

Relația dintre variațiile lungimii Δl/l și câmpul magnetic H este pătratică:

$$\frac{\Delta l}{l} = a \cdot H^2 \tag{2-7}$$

unde a este constanta magnetostrictivă. Această formă matematică are ca urmare faptul că variația lungimii este independentă de direcția câmpului magnetic. Față de frecvența curentului de excitație, frecvența de oscilație generată este deci dublă. Astfel se explică cunoscuta observație din vechime că zgomotul unui transformator corespunde dublului frecvenței de rețea. Linearitatea reușește doar printr-o premagnetizare, prin faptul că peste câmpul magnetic alternativ care excită efectul se suprapune un câmp magnetic constant de mare intensitate prin montarea unui magnet permanent puternic sau prin suprapunerea curentului alternativ cu un curent continuu. În plus față de aceasta, constanta a este dependentă nu numai de material, ci și de intensitatea câmpului magnetic și de temperatură. Rezultă deci că nu este posibil ca printr-o bară magnetostrictivă să se genereze o oscilație care să urmeze cu exactitate câmpul de excitație, așa cum este cazul elementului piezoelectric față de tensiunea de excitație. Din acest motiv oscilatoarele magnetostrictive se folosesc în perioada actuală doar rar, eventual pentru stimularea directă a undelor de bară în piese feromagnetice de forma barelor sau țevilor. Domeniul principal de folosire îl reprezintă astăzi producerea sunetelor în apă (Sonar) în domeniul 20 la 100 KHz sau drept oscilator pentru generarea sunetelor de putere, de exemplu la mașinile de găurit cu ultrasunete. Materialele oscilatoare preferate sunt nichelul, aliajele de nichel și fier și feritele cu nichel și zinc [8]. Ultimele au o conductivitate electrică redusă, încât pierderile prin curenți turbionari sunt minimalizate. Factorii de cuplare electromecanică ai acestor materiale se plasează între 0,1 și 0.3 [3]. Să amintim pentru completitudine că și în ceramicile feroelectrice și piezoelectrice există o dependență pătratică suplimentară a variației lungimii cu intensitatea câmpului electric. Efectul este analog desemnat drept *electrostricțiune*. Deoarece însă este preponderent efectul piezoelectric linear, electrostricțiunea este din punct de vedere tehnic lipsită de importanță.

2.1.4 Generarea electrodinamică a ultrasunetelor

Dacă printr-un material conducător de electricitate circulă un curent electric, atunci o parte din energia electrică este transformată în căldură, prin efectul rezistenței electrice, specifice materialului respectiv. Cauza pentru aceasta este că purtătorii de sarcină negativă (electronii) care formează curentul electric transmit prin ciocniri mediului înconjurător o parte din impulsul lor, elementele de volum fiind stimulate la oscilații mecanice. Aceste mișcări mecanice sunt de natură total *dezordonată*. Nu au nici o periodicitate și își fac simțită prezența în exterior prin căldură.

În metale sau în general în materiale cu conductibilitate electrică ridicată pot fi induși, prin bobine exterioare străbătute de curent, curenți electrici de înaltă frecvență. Prin efectul forței unui câmp magnetic static (forța Lorenz), toți purtătorii de sarcină din curentul indus sunt dirijați simultan perpendicular pe direcția curentului principal și oscilează aproape în ritmul frecvenței curentului. Această oscilație *ordonată* se transmite de asemenea elementelor volumice vecine și conduce la generarea ultrasunetelor cu frecvența menționată. Și acest efect este reciproc și poate fi folosit la recepția ultrasunetelor. În acest caz în bobine sunt induși curenți de înaltă frecvență, care corespunde frecvenței ultrasunetelor. Curenții de înaltă frecvență sunt în general desemnați drept curenți turbionari. Traductorul ultrasonic care generează sau recepționează ultrasunete prin acest sistem fără contact mecanic este denumit EMUS (după denumirea germană Elektromagnetische Ultraschallwandler) sau EMAT (după denumirea engleză electromagnetic acoustic transducers). Deoarece este vorba de o metodă la care traducătorul și piesa nu se găsesc în contact, se pot produce și detecta ultrasunete și în piese fierbinți, de exemplu până la 1200°C [9].

Fig. 2-8 prezintă principiul generării electrodinamice a ultrasunetelor [10]. În figura din stânga (a), magnetul permanent produce un câmp magnetic paralel cu suprafața piesei. În jurul jugului magnetic este înfășurată o bobină străbătută de un

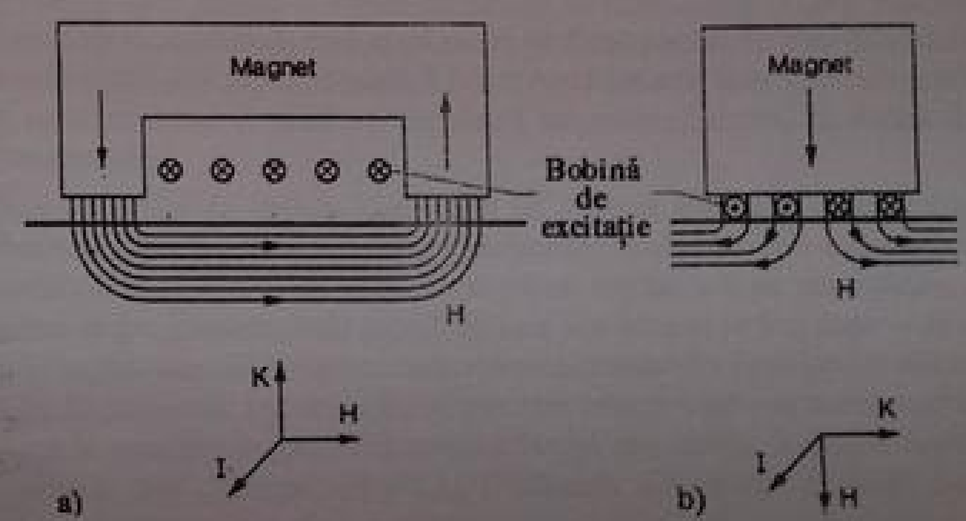


Fig. 2-8 Principiul generării electromagnetice a ultrasunetelor (după [10])

curent alternativ de înaltă frecvență. Direcția curentului din bobină este astfel aleasă încât el intră în planul desenului. Ca urmare a inducției electrice, în piesă este generat, conform regulii lui Lenz, un curent turbionar I de sens opus. Acest curent este deviat perpendicular față de suprafața piesei de către câmpul magnetic static H. Direcțiile curentului, câmpului magnetic și a forței rezultante K asupra elementelor de volum formează un sistem rectangular de coordonate de mână dreaptă. Corespunzător forței care acționează asupra lor, elementele de volum oscilează deci perpendicular pe suprafața piesei.

Opus acestei situații, în fig. 2-8 b este produs un câmp magnetic perpendicular pe suprafața piesei. Bobina este confecționată sub formă plană circulară, încât curentul iese din planul desenului în partea stângă și intră în partea dreaptă. Curenții turbionari de formă circulară induși în piesă au direcție contrară. Direcțiile curentului, câmpului magnetic și forței, desenate în figură, sunt valabile pentru domeniul din secțiunea din dreapta a bobinei. În piesa de sub bobină, asupra elementelor de volum acționează de aceea o forță îndreptată spre dreapta. Din cauza geometriei bobinei, de formă circulară, forțele acționează în general în direcție radială, dar mereu paralel cu suprafață piesei. În această direcție oscilează deci și elementele de volum în cadrul oscilațiilor ultrasonice generate în acest mod.

16

În ambele cazuri, stimularea oscilației are loc imediat sub suprafața piesei, întrucât curenții turbionari se pot forma doar acolo, din cauza efectului pelicular. În cazul frecvențelor între 100 KHz și 4 MHz, tipice pentru acest tip de stimulare, adâncimea de pătrundere a curenților reprezintă doar o fracțiune din lungimea de undă a ultrasunetelor generate.

Presiunea sonică p produsă în piesă depinde de densitatea curenților turbionari j, de câmpul magnetic H și de permeabilitatea magnetică a materialului μ.

$$p \sim j \cdot \mu \cdot H \qquad (2\text{-}8)$$

Deoarece curentul prin bobina de excitație trebuie menținut redus, din motive practice, este necesar ca intensitatea câmpului magnetic să fie aleasă cât mai ridicată posibil. De aceea sunt utilizați de preferință magneții permanenți pe bază de samariu și cobalt, care nu suferă modificări nici în timp și nici din cauza șocurilor mecanice. Prin magneții permanenți, în cazul pieselor feromagnetice, asupra traductorului se exercită o puternică forță de atracție, fenomen care poate fi avantajos atunci când traductorul trebuie fixat de piesă.

Traductorii cu magnet permanent sunt denumiți și EPW (după denumirea germană Elektrodynamische Permanent Wandler) [11]. În mult mai multe cazuri însă câmpul magnetic necesar este generat de un alt sistem de bobine, care este străbătut de un curent cu intensitate corespunzătoare. În amândouă situațiile, modul de acțiune al traductorului ultrasonic electrodinamic poate fi optimizat prin cultivarea câmpului magnetic și a bobinelor [12]. Totuși factorii de cuplare electromecanică rămân în

domeniul 0,001 [6] și sunt în mod clar mai reduși decât la materialele piezoelectrice.

În afara de aceasta, în cazul traductorilor electrodinamici, distanța până la piesă trebuie păstrată cât mai mică posibil, deoarece și câmpul magnetic H și curentul turbionar indus j din relația (2-8) scad aproximativ exponențial odată cu creșterea distanței dintre traductor și piesă. Factorul 3 pe fiecare milimetru de distanță servește ca valoare orientativă pentru scăderea sensibilității, atunci când se emite și se recepționează cu același traductor [9]. Sensibilitatea reală a unui traductor electrodinamic este previzibilă doar în situații speciale, întrucât permeabilitatea μ din relația (2-8) este de cele mai multe ori necunoscută. În straturile de tunder sau cu coroziune, cu care piesele sunt adesea acoperite, permeabilitatea poate fi până la de zece ori mai mare decât în materialul propriu-zis. Într-un astfel de caz, presiunile sonice generate sunt corespunzător mai ridicate. Câmpurile sonice generate de traductori electrodinamici sunt în general mai complicate decât în cazul stimulării piezoelectrice, pentru că depind puternic de geometria bobinelor și a câmpului magnetic. În plus, în metalele feromagnetice apare suprapusă și o generare magnetostrictivă a unui fascicul sonic.

Traductorii electrodinamici conform schemei din fig. 2-8b pot fi confecționați și în forme de dimensiuni foarte mici. Ei sunt de aceea utilizați cu succes la măsurarea câmpurilor sonice în corpurile solide: distribuția presiunii sonice care există pe suprafața corpurilor solide metalice este cercetată fără contact direct cu un traductor electrodinamic potrivit.

2.1.5 Stimularea cu laser

O altă posibilitate de a stimula fără contact ultrasunete într-o piesă se bazează pe utilizarea laserilor. Laserii sunt surse de lumină coerentă care, spre deosebire de sursele de lumină difuză, produc oscilații electromagnetice ordonate spațial și temporal, oarecum asemănător cu oscilațiile ultrasonice ordonate spațial și temporal, oarecum asemănător cu oscilațiile ultrasonice ordonate ale elementelor de volum învecinate, deosebite de oscilațiile termice dezordonate, menționate în paragraful precedent. Sursele de lumină laser produc fascicule de lumină cu diametre de ordinul milimetrilor, cu divergență foarte redusă, care se conservă pe distanțe mari. În afară de aceasta, laserul se evidențiază prin faptul că poate fi foarte rapid conectat și deconectat optoelectronic. În acest mod pot fi produse impulsuri luminoase, scurte, cu durată de câteva nanosecunde.

Dacă un astfel de impuls laser cade pe o piesă metalică, o parte din energia electromagnetică este absorbită și transformată în căldură, prin acțiune reciprocă cu purtătorii de sarcină (electroni). Acest proces are loc într-un strat subțire, de cca. o miime de μm grosime, de la suprafață, care prin aceasta se încălzește și se dilată. Iau astfel naștere tensiuni mecanice, care provoacă elementelor de volum învecinate oscilații de înaltă frecvență. Deoarece stimularea prin impuls laser este foarte scurtă, sunt generate în principiu impulsuri ultrasonice (astfel sunt numite oscilațiile foarte scurte și limitate în timp - vezi par. 2.2 și 3.1). Deplasarea elementelor de volum din fig. 2-9 a are loc paralel cu suprafața.

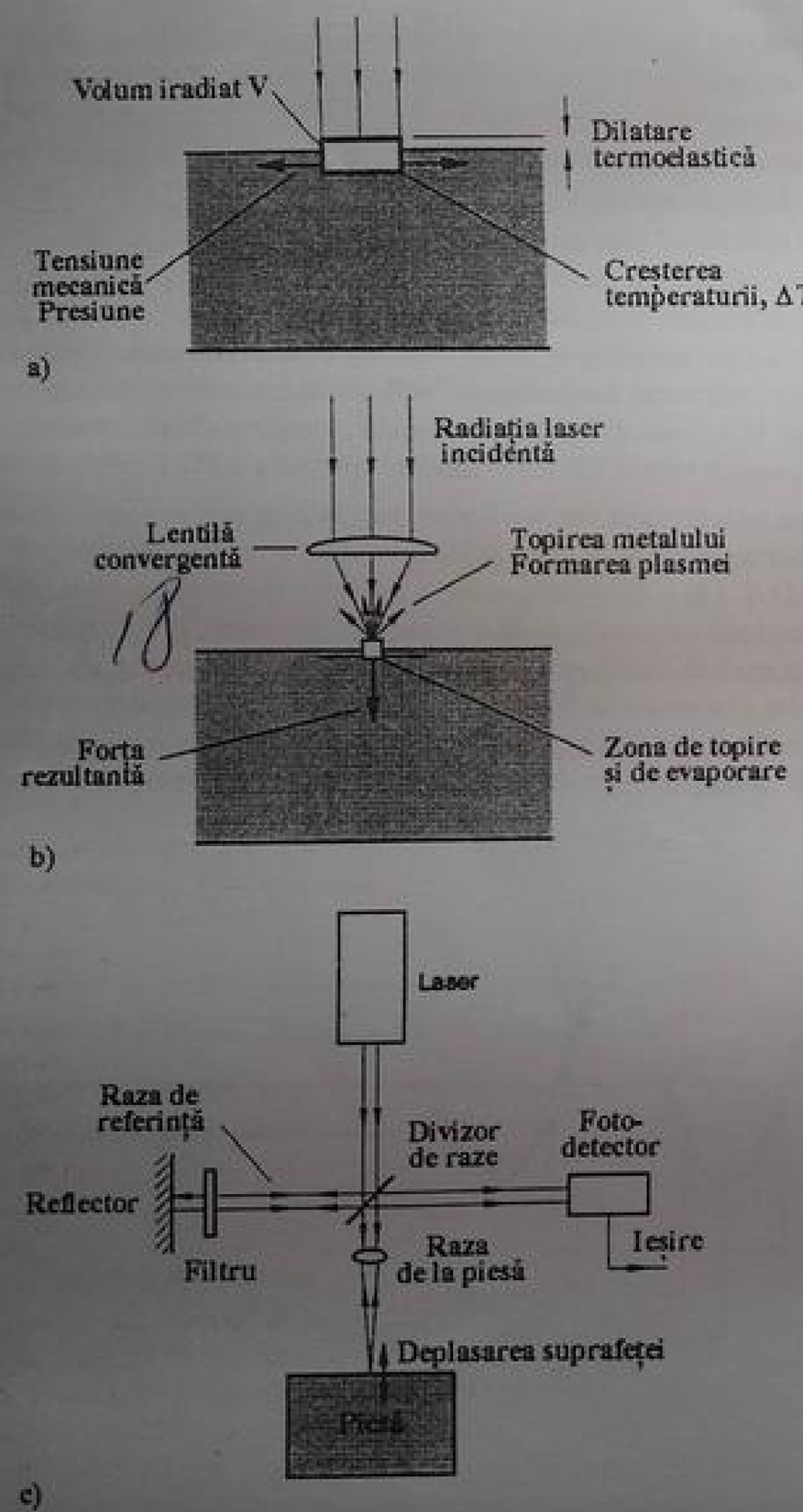


Fig. 2-9 Excitarea și recepția ultrasunetelor cu ajutorul laserului [13]

Mărind intensitatea laserului, de ex. prin focalizare (fig. 2-9 b) , suprafața piesei este așa puternic încălzită în momentul ciocnirii cu impulsul laserului, încât atomii din apropierea suprafeței sunt cuasivaporizați. În această situație se produce o formă de recul mecanic, care exercită o forță perpendiculară pe elementele de volum învecinate și o transformă în oscilații pe această direcție. Același efect poate fi realizat atunci când pe suprafață este mai întâi aplicat un strat subțire de ulei sau de vopsea. Într-o astfel de situație se evaporă doar stratul aplicat, suprafața piesei rămâne intactă.

Reciproc, oscilațiile ultrasonice într-un corp solid pot fi detectate cu ajutorul unui dispozitiv cu laser, fără contact mecanic (fig. 2-9 c). Deplasarea suprafeței piesei este măsurată punct cu punct cu ajutorul unui interferometru. Raza laser este despicată cu ajutorul unei oglinzi semitransparente într-o rază de referință și o rază dirijată spre suprafața piesei, unde este reflectată. Raza de referință și cea reflectată de piesă se suprapun și sunt dirijate spre un detector. Acesta măsoară variația dintre cele două raze când suprafața piesei se mișcă. Tensiunea electrică de ieșire este proporțională cu devierea suprafeței față de poziția de echilibru.

În vreme ce stimularea prin laser conduce la o excitare a oscilațiilor la fel de ridicată comparativ cu cazul materialelor piezoelectrice, în cazul recepției, cele mai mici deviații detectabile cu ajutorul efectului piezoelectric sunt cu 3 ordine de mărime mai reduse decât în cazul laserului. Din următoarele motive, anume cheltuieli ridicate privind aparatura, frecvențele de repetiție a impulsurilor prea reduse în cazul emisiei (din cauza puterii prea ridicate a laserilor) - vezi par. 3.2 - și nu în ultimul rând din cauza măsurilor de protecție necesare în cazul utilizării luminii laser, aplicațiile tehnice ale ultrasunetelor induse și detectate prin laser sunt rare și limitate doar la cazurile la care metodele de generare și detectare prezentate în paragrafele anterioare nu funcționează. Distanța dintre piesă și laser poate fi foarte mare. Acest fapt permite de ex. generarea ultrasunetelor în piese fierbinți sau contaminate radioactiv. De asemenea alte metode nu permit nici măcar o extensie redusă a domeniului de generare a sunetelor. De altfel recepția ultrasunetelor prin laseri este până acum singura posibilitate de măsurare directă în unități de lungime a deplasărilor reale suferite de elementele de volum. Această metodă a recepției ultrasunetelor este adecvată de asemenea pentru calibrarea absolută a traductorilor ultrasonici de tip piezoelectric, magnetostrictiv sau electromagnetic, ca și pentru măsurători ale câmpurilor sonice. O descriere mai amănunțită se găsește în [13].

2.2 Noțiuni de teoria oscilațiilor

Noțiunile de teoria oscilațiilor necesare pentru înțelegerea fundamentală a fenomenelor ondulatorii și proprietățile sunetelor se pot explica bine pe exemplul producerii sunetelor cu ajutorul unei plăcuțe piezoelectrice stimulate pentru a oscila. Deoarece *oscilație* înseamnă întotdeauna modificarea periodică a unei mărimi de stare, aceasta poate fi

aici ori grosimea plăcii ori poziția momentană a suprafețelor sale în mișcare. Intuitiv, o plăcuță tip disc oscilând poate fi reprezentată prin două plăci legate prin două arcuri. În fig. 2-10, placa inferioară este fixată pe un perete rigid și împiedicată să oscileze. Acesta ar fi cazul din practică atunci când discul piezoelectric este lipit pe un suport greu și rigid. În diagrama din dreapta este reprezentată deviația x a plăcii superioare în funcție de timp. Mișcarea din poziția de repaus până la deviația negativă maximă, drumul invers prin zero până la deviația pozitivă maximă și apoi înapoi până la poziția de plecare este desemnată drept *o oscilație* sau - preluată din funcția matematică corespunzătoare - o oscilație sinusoidală. Valoarea deviației maxime se numește *amplitudine*, iar situația momentană a oscilației, de ex. punctele marcate cu cifrele 1-9 în fig. 2-10, este denumită *fază* sau *poziția fazei*. Timpul necesar parcurgerii unei oscilații complete este *perioada de oscilație* t_s. Valoarea inversă indică numărul de oscilații pe unitatea de timp (fig. 2-11) și a fost deja introdus în par. 2.1.1 drept *frecvența* f.

Similar poziției unui punct pe un cerc, care poate fi indicată prin rază și un unghi între 0° și 360° în coordonate polare, se caracterizează și starea ce se repetă periodic a unei oscilații față de un anume moment de timp t prin *unghiul fazei* φ (fig. 2-12).Punctul zero este acum poziția de repaus sau devierea x=0. Dacă se compară două oscilații cu aceeași frecvență, interesează de obicei doar diferența temporală de drum Δt, care se indică ca *diferență de fază* Δφ. Două oscilații de aceeași frecvență au o diferență de fază de 180° când se găsesc una în maximul pozitiv al oscilației, iar cealaltă în maximul negativ. Întrucât amplitudinile lor A sunt o dată pozitivă, o dată negativă, adunarea

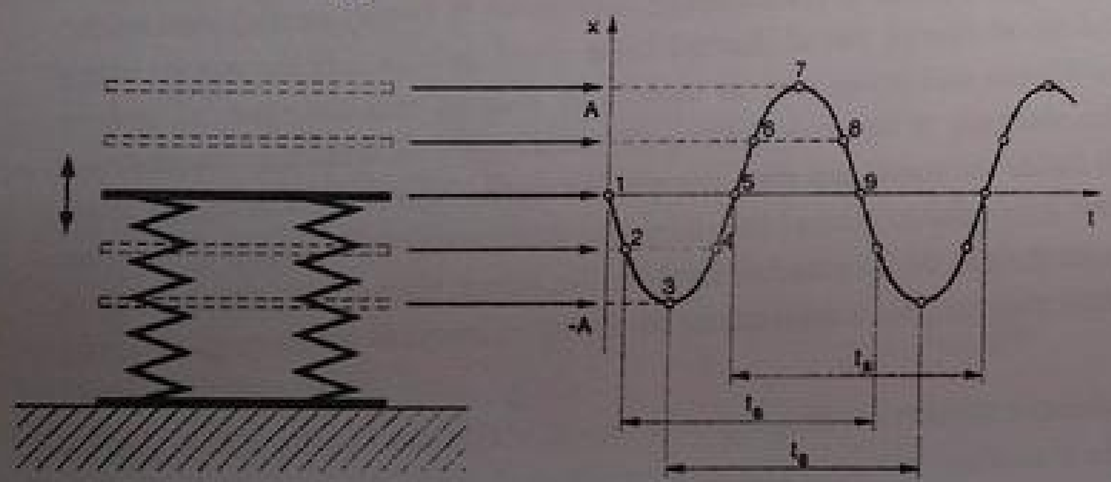


Fig. 2-10 Oscilația unei plăci așezate pe resort (stânga) și prezentarea ei în funcție de timp (dreapta); ts - timp de oscilație; x - elongația; t - axa timpului

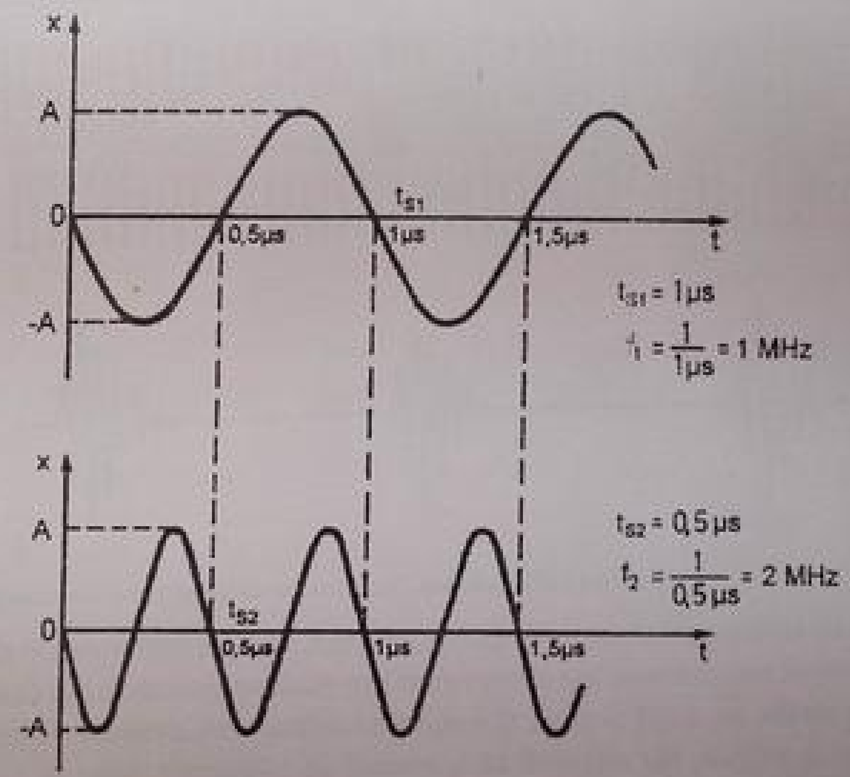


Fig. 2-11 Exemplu de oscilații cu perioade, respectiv frecvențe, diferite

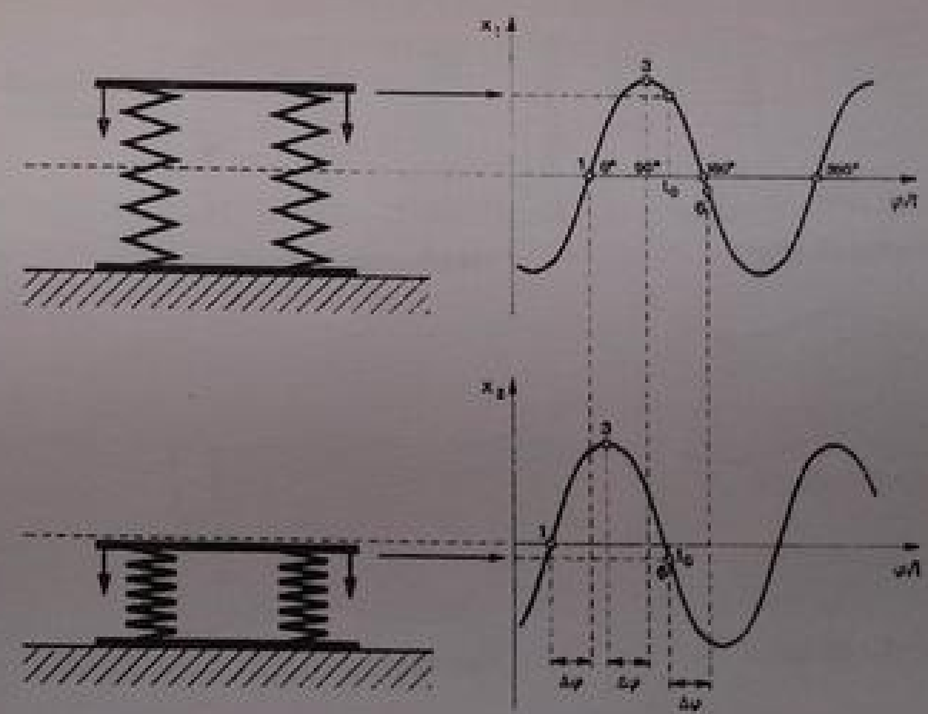


Fig. 2-12 Pentru explicarea diferenței de fază Δφ

lor dă valoarea zero. Dacă ambele oscilații sunt în fază, rezultă o sumă de 2A. În cazul unei suprapuneri a oscilațiilor, când amplitudinile corespunzătoare se adună, ținând seama de fazele lor în fiecare moment, se vorbește în principal de *interferență*. Dacă adunatrea produce o mărire a amplitudinii singulare, este vorba de o interferență pozitivă sau constructivă, iar dacă are loc o micșorare a amplitudinii, interferența este negativă sau distructivă. Interferențele sunt de natură multiplă. Și suprapunerea a două oscilații cu frecvențe diferite conduce de asemenea la interferențe. Exemplul cel mai cunoscut îl reprezintă bătăile, fenomen la care, prin suprapunerea a două oscilații cu frecvențe apropiate f_1 și f_2, rezultă o frecvență comună de oscilație $(f_1+f_2)/2$, a cărei amplitudine oscilează în sus și în jos cu o frecvență egală cu diferența $(f_1-f_2)/2$.

În opoziție cu oscilația continuă a unei plăci piezoelectrice, care ia naștere când aceasta este stimulată continuu cu o oscilație electrică sinusoidală (fig. 2-13 a), se vorbește de impulsuri de oscilații când oscilația este limitată în timp. Impulsul prezentat în fig. 2-13 b ia naștere de exemplu când o placă piezoelectrică își modifică grosimea ca urmare a unei descărcări electrice de scurtă durată, modificare ce conduce succesiv la o oscilație, a cărei amplitudine scade rapid. Se vorbește în acest caz de o oscilație *amortizată*. Cauza amortizării nu este numai amortizarea internă a piezomaterialului, dependentă de natura acestuia, ci și cedarea energiei de oscilație mediului înconjurător.

Oscilația suprafeței unui disc piezoelectric sau mai general al unui corp oscilant, va genera mai întâi doar mișcarea straturilor de materie adiacente. Mișcarea se transmite totuși continuu la următoarele straturi de materie. În cazul oscilațiilor grosimii discului piezoelectric conform fig. 2-4 a (1), ca urmare a acestora ia naștere o serie de compresiuni (suprapresiune) și de rarefieri (subpresiune) în direcția mișcării care generează sunetele (fig. 2-14 a). *Unda* astfel formată, la care direcția de oscilație a particulelor materiale este paralelă cu direcția de propagare, este numită *undă longitudinală* sau *undă de compresiune*. Ea poate fi stimulată în materiale solide, fluide sau gazoase. Materialul în care se transmite unda este desemnat adesea drept mediu de propagare. Propagarea undei are loc cu *viteză sonică* caracteristică fiecărui material. Aceasta este în mare măsură independentă de frecvență, dar depinde totuși de starea de agregare, de structura cristalină, de temperatură și de presiunea statică a mediului de propragare.

Când suprafața plăcuței piezoelectrice este stimulată pentru a executa o mișcare de forfecare conform fig. 2-4 b (2), în mediul adiacent care transmite mișcarea ia naștere o *undă transversală*, numită și *undă de forfecare* (fig. 2-14 b). Direcția de oscilație a particulelor materiale este în acest caz perpendiculară pe direcția de propagare. Undele de forfecare se pot propaga doar în solide, deoarece gazele și fluidele nu opun nici un fel de rezistență față de solicitări la forfecare. Viteza lor de propagare este întotdeauna mai redusă decât cea a undelor longitudinale.

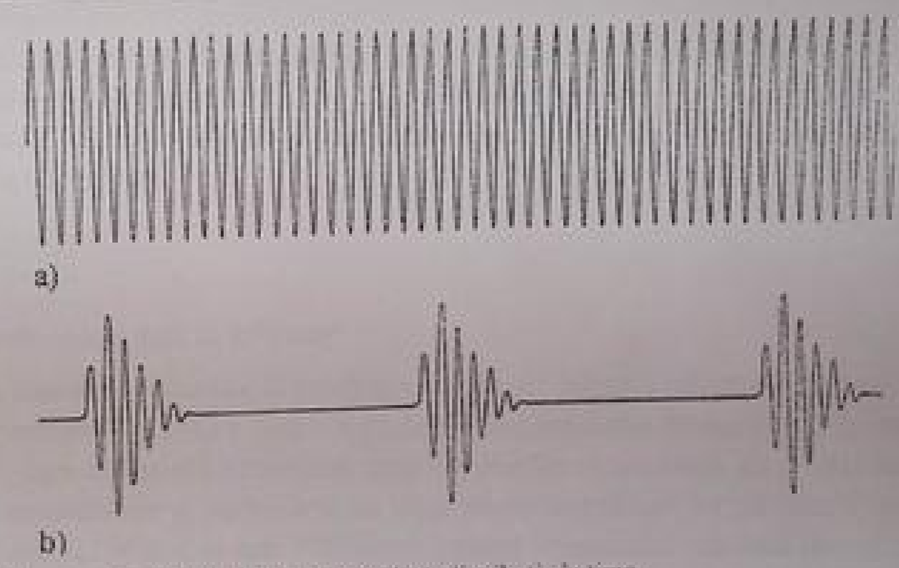


Fig. 2-13 Sunet continuu (sus) și în impuls (jos), distribuția în timp.

În situația în care materialul este mărginit, există alte tipuri caracteristice de unde, care se formează din unde longitudinale sau transversale sau care compun forme mixte din combinații ale acestora. Pentru diferitele tipuri de undă se folosește adesea și noțiunea de *moduri de undă*. Oscilațiile de îndoire și de întindere ale plăcilor și barelor (fig. 2-14 c și 2-14 d) sunt cunoscute drept *unde de bară*, *unde de placă* sau *unde Lamb*.

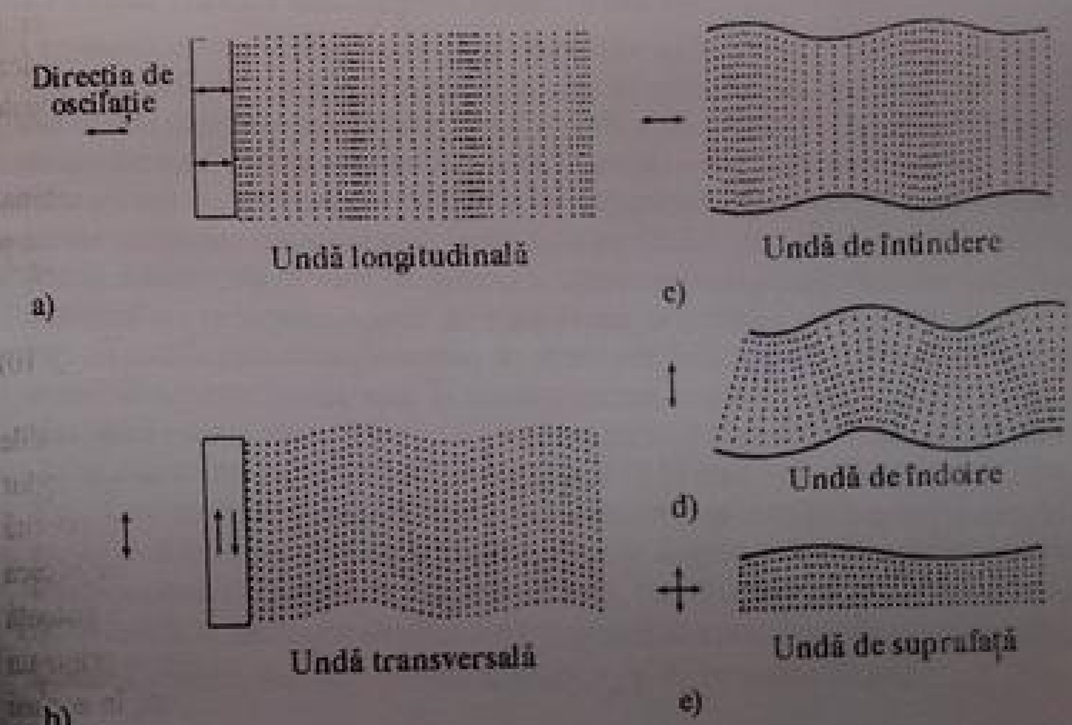


Fig. 2-14 Tipuri de unde: a) în mediu de propagare de orice natură; b) - e) în corpuri solide

Fig. 2-14 e prezintă ca formă mixtă *unda de suprafață* sau *unda Rayleigh*. Viteza ei de propagare este mereu ceva mai redusă decât cea a undei transversale. *Unda de fluaj* sau *de scurgere* are viteza de propagare a unei unde longitudinale. Numele ei provine din faptul că se propagă imediat sub suprafața materialului.

Pentru informații suplimentare, vezi [4,14,15,16].

2.3 Câmpuri sonice.

2.3.1 Noțiuni pentru caracterizarea câmpurilor sonice.

Variațiile de densitate care pot caracteriza un câmp sonic (fig. 2-14 a) au ca urmare modificări de presiune, variabile în timp și spațiu. Noțiunile de teoria oscilațiilor din par. 2.2 se referă deci în cazul propagării în gaze, fluide și solide doar la *presiunea sonică alternativă* p~.Valoarea sa maximă este denumită amplitudinea presiunii sonice sau mai scurt presiunea sonică p. Ea este rar prezentă în unități absolute, pascal [N/m²] sau bar [10⁵ N/m²], cel mai adesea ca nivel al presiunii sonice L, în decibeli [dB], raportat la valoarea de referință p_0:

$$L[dB] = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \qquad (2\text{-}9)$$

Dacă presiunea sonică este dublă sau doar jumătate din p_0, valoarea lui L este +6 dB sau -6dB. Dacă p este de 10 ori mai mare decât p_0, rezultă L=+20 dB. Avantajul acestui sistem logaritmic constă în faptul că valorile exprimate în dB se pot aduna sau scădea, în vreme ce la prezentarea presiunilor reale, în locul acestor operații ar trebui efectuate operații mai complicate de înmulțire sau împărțire.

Cea mai importantă mărime caracteristică pentru propragarea sonică într-un material este *impedanța acustică specifică* Z. Ea reprezintă produsul dintre viteza sonică c și densitatea ρ:

$$Z=\rho \cdot c \qquad (2\text{-}10)$$

24

Tabelele 3.2 până la 3.5 din par. 3.5 oferă o privire de ansamblu privind caracteristicile acustice ale celor mai cunoscute materiale. Surprinde faptul că domeniul impedanțelor acustice specifice ale diferitelor materiale cuprinde câteva ordine de mărime, datorită diferitelor stări de agregare ale materialelor. Imedanța acustică specifică este adesea denumită *impedanță acustică* sau *rezistență a undelor sonice*. Denumirea de rezistență provine din similitudinea cu teoria electricității. Acolo curentul și tensiunea printr-un conductor cu o rezistență electrică caracteristică materialului sunt legate în același mod în care sunt legate în cazul unei unde sonore viteza de deplasare a particulelor în mișcare - este vorba de viteza lor maximă, realizată la trecerea prin punctul de repaus - și presiunea sonică cu rezistența acustică.

Ca și în cazul curentului electric, într-o undă sonică se transportă energia. Cantitatea de energie acustică care trece printr-o suprafață în unitatea de timp este denumită *intensitate* I. Analog mărimile electrice, intensitatea se calculează din presiunea sonică și din impedanța acustică:

$$I=\frac{p^2}{2Z} \qquad (2\text{-}11)$$

și este de obicei dată în mW/cm².

Pentru evaluarea riscurilor în privința sănătății ale folosirii ultrasunetelor, orice impuls sonic conform fig. 2-13 b este însoțit pe lângă intensitatea de moment și de intensitatea medie , care reprezintă o medie în timp a valorilor momentane ale intensității. Aici se iau în considerație și perioadele de timp dintre impulsuri. Valori pentru intensitatea medie sub 0,1W/cm² și sub 100W/cm² pentru intensitatea maximă momentană sunt considerate în momentul de față complet fără urmări pentru țesuturile umane [4]. În domeniul încercărilor nedistructive ale materialelor, intensitățile întâlnite au de cele mai multe ori valori substanțial mai reduse. Rezultă că nu există nici un fel de pericol pentru cei ce intră în contact cu astfel de câmpuri sonice. Cercetările medicale noi recomandă totuși evitarea unor expuneri prelungite nenecesare chiar în cazul utilizării ultrasunetelor în scop diagnostic [245].

2.3.2 Emisia sonică a suprafețelor circulare sau dreptunghiulare.

La generarea ultrasunetelor, suprafețele emițătoare au în marea majoritate a cazurilor formă circulară sau dreptunghiulară. Conform principiului lui Huygens, din fiecare punct al unei suprafețe emițătoare pleacă o undă sferică. Câmpul sonic într-un punct oarecare din mediul de propagare reprezintă suprapunerea după amplitudine și fază a tuturor acestor unde elementare. Chiar în fața suprafeței emițătoare, distanțele până la punctele emițătoare singulare sunt foarte diferite. Undele parțiale ajung acolo deci cu diferențe substanțiale de timp de parcurs și diferențe corespunzătoare, mari, de fază. Fenomenul are ca urmare o serie de stingeri sau amplificări ale presiunii sonice, în raport cu poziția punctului momentan de observare. Prin urmare, în așa numitul *câmp apropiat* al surselor sonice apar la distanțe reduse minime și maxime ale presiunii sonice, după cum se observă în fig. 2-15 a în cazul unei suprafețe emițătoare circulare, un fel de disc piezoelectric. Direct pe axă (fig. 2-15 b) presiunea sonică variază între 0 și 2 p_k. La o anumită distanță z față de sursa sonică, așa-numita *lungime a câmpului apropiat* N, diferențele de distanță până la punctele singulare ale sursei sonice au valori mai reduse decât o jumătate de lungime de undă, corespunzând unei diferențe de fază de 180°. Acolo se întâlnește un ultim maxim principal. Lungimea câmpului apropiat N a unui disc circular depinde de raza acestuia, r_0, și de lungimea de undă:

$$N=\frac{r_0^2}{\lambda} \qquad (2\text{-}12)$$

Interferența tuturor undelor elementare la distanțe mai mari, în așa-numitul *câmp depărtat*, este doar pozitivă. Presiunea sonică scade aici cu 1/z, ca în cazul unei unde

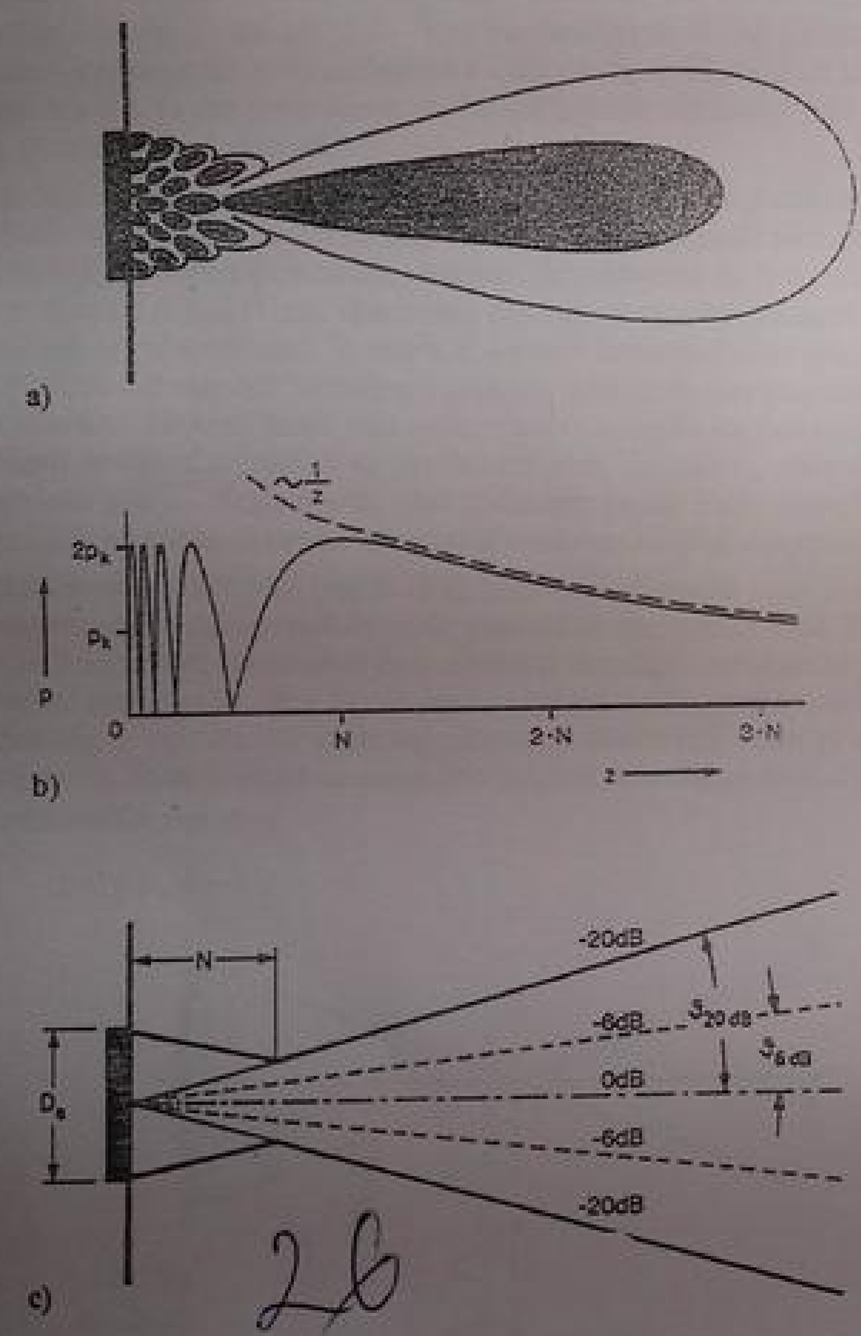


Fig. 2-15 Câmpul sonic al unui oscilator tip disc circular
a) reprezentare schematică
închis: zone cu presiune sonică ridicată
deschis: zone cu presiune sonică redusă
b) presiunea sonică pe axa mediană (valoare absolută)
c) reprezentarea deschiderii unghiulare a câmpului sonic

sferice, deoarece câmpul sonic se deschide, ca în cazul unui reflector conic, iar energia sonică se distribuie pe o suprafață mereu mai mare. Pentru caracterizarea câmpului depărtat este suficient să se cunoască la ce distanțe față de axa mediană presiunea sonică se diminuează la jumătate (6dB) sau la o zecime (20dB) față de valoarea corespunzătoare de pe axă. Conurile sonice astfel definite (fig. 2-15 c) se pot descrie prin *unghiurile de deschidere* ϑ. Valorile lor rezultă din formulele:

$$\sin \vartheta_{-6dB} = 0{,}7 \cdot \frac{\lambda}{2r_e} \qquad (2\text{-}13)$$

$$\sin \vartheta_{-20dB} = 1{,}09 \cdot \frac{\lambda}{2r_e} \qquad (2\text{-}14)$$

Rezultă că, la aceeași frecvență, fasciculul sonic este cu atât mai închis cu cât este mai mare raza sursei sonice, iar la aceeași rază, cu cât este mai mică lungimea de undă. O sursă punctiformă iradiază practic uniform în toate direcțiile. Stabilind poziția sursei punctiforme pe liniile - 6dB sau -20dB, discul piezoelectric ar percepe o presiune sonică medie care ar fi cu 6dB, respectiv 20dB mai mică decât dacă sursa punctiformă ar fi poziționată pe axa mediană. Dacă se emite și se recepționează cu același disc piezoelectric, atunci scăderile dependente de direcție, date în dB, pentru cazul emisiei și cel al recepției trebuie adunate.

În cazul traductorilor ultrasonici cu plăcuță piezoelectrică rotundă (disc) se definește adesea *diametrul efectiv al oscilatorului*, care este mereu ceva mai mic decât diametrul real al oscilatorului. În acest caz apare posibilitatea să se ia în calcul faptul că domeniile de margine contribuie neuniform sau chiar nu contribuie la radiația sonică a oscilatorului. Cauza acestui fenomen o reprezintă nu atât efectele mecanice de margine, cât faptul că majoritatea oscilatorilor nu au zonele marginale metalizate, din motive constructive. Întrucât în acele zone lipsește tensiunea de excitație, oscilează "efectiv" doar domeniul median metalizat.

Dacă suprafața emițătoare nu este circulară, atunci nici câmpul sonic nu are simetrie de rotație. În cazul unui oscilator piezoelectric de formă dreptunghiulară, cu laturile a și b, se observă o concentrare sonică sub formă de fascicul nu numai pe direcția muchiei a, ci și pe cea a muchiei b. Și în acest caz se poate defini în câmpul depărtat, pentru fiecare direcție a muchiilor, câte un unghi de deschidere conform formulelor aproximative:

$$\sin \vartheta_{\square -6dB} = 0{,}6 \cdot \frac{\lambda}{2a} \qquad (2\text{-}15)$$

$$\sin \vartheta_{\square -20dB} = 0{,}91 \cdot \frac{\lambda}{2a} \qquad (2\text{-}16)$$

Lungimea câmpului apropiat al unui oscilator dreptunghiular rezultă din formula:

$$N_{\square}=k_{\square}\cdot\frac{a^2}{\lambda} \qquad (2\text{-}17)$$

Constanta $k_{\square}$ depinde de raportul lungimilor muchiilor a/b. Ea are valoarea 1,37 când a/b=1 și valoarea 1 când a/b>2. În cazul oscilatorilor de formă pătratică , distribuția presiunii sonice pe axă este asemănătoare celei din fig. 2-15 c. Cu cât sunt mai diferite muchiile a și b, cu atât mai puternic scad amplitudinile maximelor presiunii sonice pe axă, chiar în câmpul apropiat.

Suprafețele oscilante de formă sferică sau cilindrică produc o *focalizare* punctiformă, respectiv liniară a ultrasunetelor (fig. 2-16). Practic în punctul median de curbură se întâlnesc toate undele elementare, simultan, fără diferențe de fază, intensificându-se. Drept *distanță focală* F este desemnată distanța maximului presiunii sonice față de vârful suprafeței emițătoare. În realitate, datorită fenomenului de difracție (vezi par. 2.3.3), distanța focală este întotdeauna ceva mai mică decât raza geometrică de curbură, r. În interiorul distanței focale este inclus câmpul apropiat, cu maximele și minimele presiunii sonice. Comparativ cu oscilatorul plan, cu raza r_s, câmpul apropiat este comprimat prin focalizare practic până la distanța focală. Ea nu poate fi niciodată mai mare decât lungimea câmpului apropiat al oscilatorului plan corespunzător.

În cazul unui oscilator plan (fig. 2-15 a), îngustarea câmpului sonic la o distanță egală cu lungimea câmpului apropiat este independentă de lungimea de undă. 81% din întreaga energie sonică sunt concentrate pe o suprafață circulară cu diametrul egal cu 0,6 din diametrul oscilatorului. Prin focalizare cu ajutorul unei suprafețe oscilante de formă sferică (fig 2-16), această suprafață circulară, desemnată acum prin diametrul de focalizare D_F, poate fi redusă nu numai prin lungimi de undă mai mici, ci și prin diametre ale oscilatorilor mai mari:

$$D_F=1{,}22\cdot\frac{F\cdot\lambda}{r_s} \qquad (2\text{-}18)$$

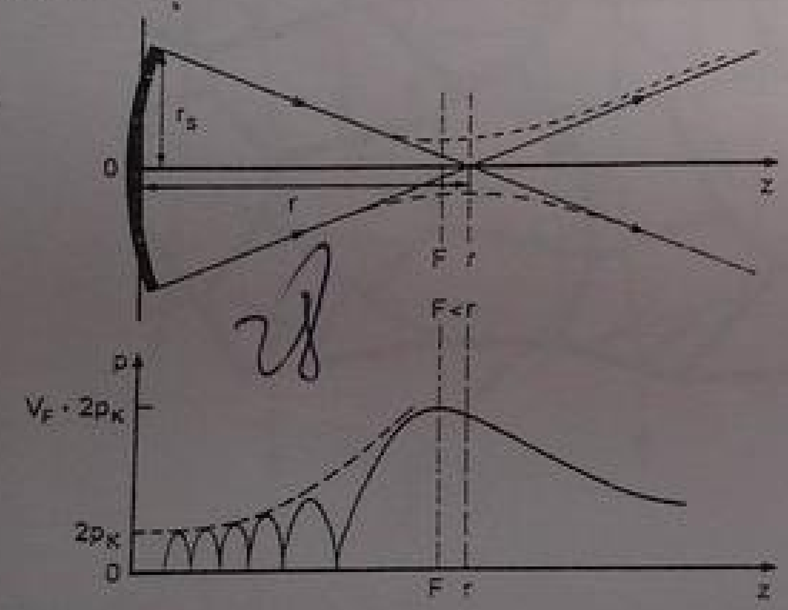


Fig. 2-16 Privind focalizarea cu suprafețe emițătoare cu bate

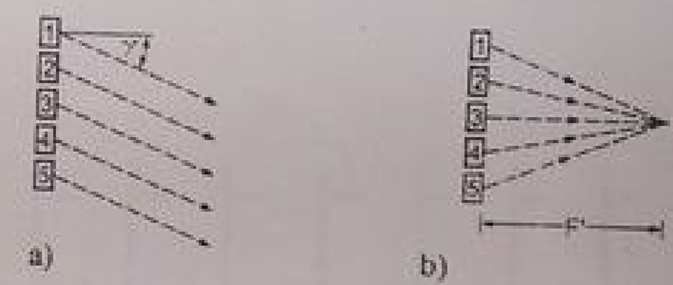


Fig. 2-17 Principiul emițătorilor de grup (aranjament în fază)
a) schimbarea direcției emisiei
b) focalizarea

Mărirea corespunzătoare a presiunii sonice în punctul focal, comparativ cu cazul oscilatorului plan poate fi exprimată aproximativ prin factorul V_r [4]:

$$V_r=\frac{\pi\cdot r_s^2}{\lambda\cdot F} \qquad (2\text{-}19)$$

Această relație este adevărată cât timp diametrul oscilatorului D_s nu depășește $0{,}2\cdot r$. Pentru un calcul exact, în relațiile (2-18) și (2-19), în locul distanței focale F ar trebui folosită raza de curbură, r. Pentru simplitate se consideră că r și F se deosebesc puțin. În fapt, cele două valori se apropie cu atât mai mult, cu cât frecvența este mai înaltă [17].

În încheiere este analizat cazul în care suprafața oscilantă emițătoare este compusă din mai multe elemente singulare (fig.2-17). Dacă elementele sunt suficient de mici comparativ cu lungimea de undă, atunci fiecare din ele formează practic o sursă punctiformă cu emisie sonică sferică. Dacă toate elementele oscilează simultan și uniform, atunci câmpul sonic este identic cu cel al unui oscilator coerent cu aceeași suprafață totală. Dar elementele pot executa și oscilații întârziate între ele. Această decalare în timp poate fi astfel aleasă încât ca să compenseze diferențele naturale de timp de parcurs din mediul de propagare. În acest mod este posibilă generarea așa-numitelor câmpuri sonice sintetice. O singură celulă poate produce devierea direcției de emisie (fig. 2-17 a) sau focalizarea pe un domeniu înainte stabilit, la distanța focală F' (fig. 2-17 b) prin întârzieri adecvate. Astfel de dispozitive sunt denumite și *emițători tip grup* sau *Phassed Arrays* (aranjamente în fază).

Recent, aceste aranjamente în fază sau utilizate pentru focalizarea undelor Rayleigh sau Lamb, pentru depistarea defectelor din apropierea suprafeței [242]. Printr-un proces repetat de prelucrare se reușește chiar o focalizare automată a energiei sonice pe defecte situate în domeniul pe care îl cuprinde palpatorul. Pentru aceasta se determină mai întâi cu un impuls sonic primar diferiții timpi de parcurs între defecte și elementele singulare ale aranjamentului, care sunt apoi folosiți în controlul propriu-zis succesiv drept întârzieri pentru comanda înnoită a emițătorilor singulari și

pentru semnalele de recepție, fapt ce are drept urmare focalizarea dorită pe defect.

2.3.3 Comportarea la suprafețe de separație

Chiar și într-un mediu de propagare omogen, unda sonică pierde energie odată cu creșterea distanței parcurse. Presiunea sonică scade de aceea într-un ritm mai puternic decât ar fi de așteptat ca urmare a divergenței naturale a câmpului sonic. Acest fapt se datorează unei proprietăți specifice fiecărui material, *atenuarea sonică*, pentru care sunt răspunzătoare două caracteristici de material, anume *absorbția* (transformare în căldură) și *împrăștierea* pe structura materialului, de ex. granulele din metale sau fibrele din placaje (fig 2-18). Aici este vorba de suprafețe de separație cu orientare oarecare. Raportul dintre mărimea granulelor și lungimea de undă influențează în mod decisiv tipul și proporția împrăștierii. Atenuarea sonică este deci în principal dependentă de frecvență. În cazul frecvențelor fixe sau al domeniilor de frecvență în care variațiile sunt reduse, atenuarea se exprimă în dB/m.

La marginile obstacolelor din interiorul mediului de propagare are loc fenomenul de *difracție* (fig. 2-19). Difracția face ca, la o anumită distanță de la obstacol, efectul

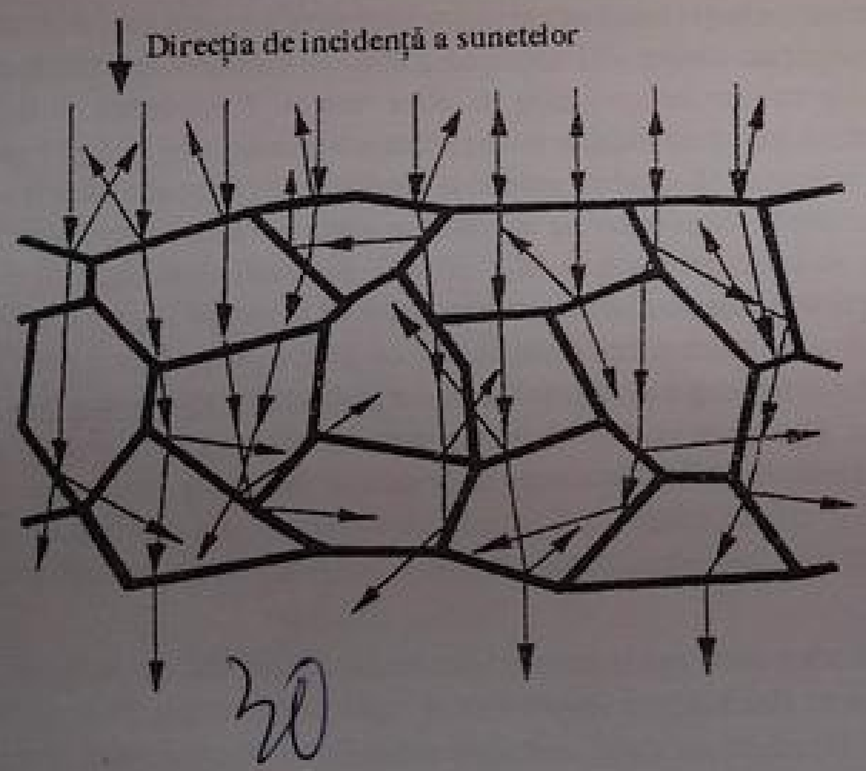


Fig. 2-18 Împrăștiere prin reflexii la limitele granulelor (schematic, simplificat)

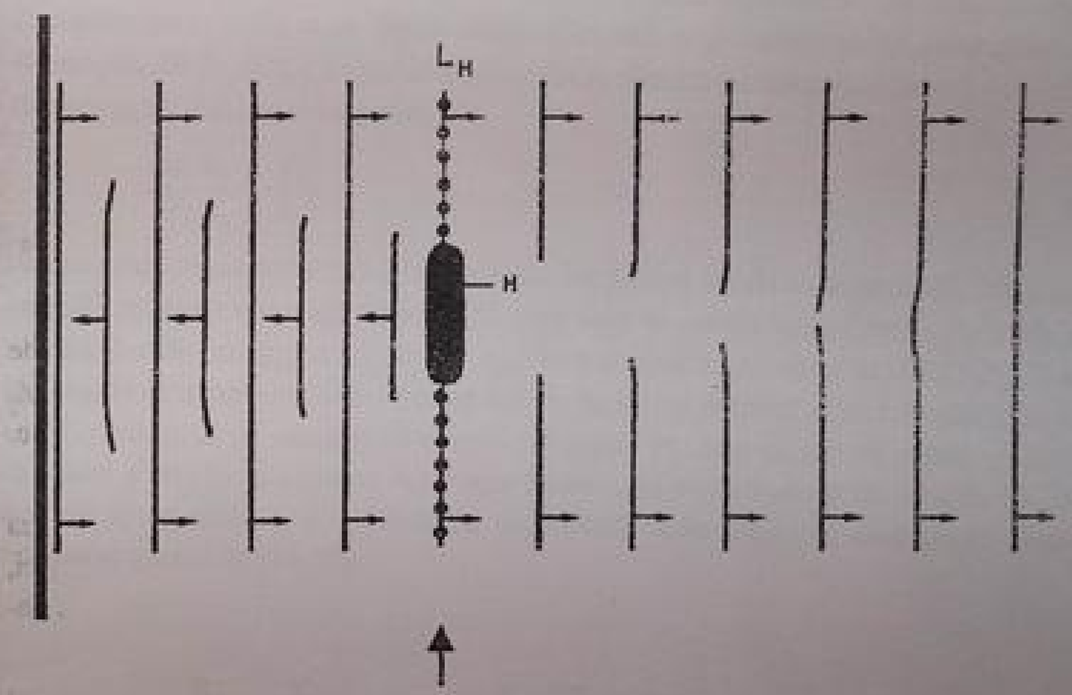


Fig. 2-19 Reflexia și curbarea unei unde incidente dinspre stânga pe un obstacol H

de umbră al acestuia să fie anulat și întregul domeniu să fie populat în mod uniform de ultrasunete. Considerând domeniile populate sonic din lungul liniei L_H de deasupra și dedesubtul obstacolului H drept puncte de plecare ale undelor elementare Huygens (desenate ca puncte în figura 2-19), acestea se anihilează chiar în spatele obstacolului, deoarece diferențele de fază iau orice valoare între 0 și 360° și multipli de 360°. Suma acestor suprapuneri este zero. Deabia la distanțe mai mari în spatele obstacolului, diferențele de fază ale tuturor undelor ce se suprapun devin mai mici de 360°, încât apare interferența pozitivă. Zona de stingere din spatele obstacolului este cu atât mai scurtă, cu cât este mai mare lungimea de undă.

Dacă o undă sonică cu presiunea sonică p_i atinge perpendicular suprafața de separație dintre două medii diferite (1) și (2) (fig. 2-20), o parte din presiunea sonică este reflectată perpendicular ($R \cdot p_i$), iar o parte transmisă ($T \cdot p_i$). Hotărâtoare pentru *factorul de reflexie* R și pentru *factorul de transmisie* T sunt rezistențele acustice Z_i corespunzătoare celor două medii adiacente:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad (2\text{-}20)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \qquad (2\text{-}21)$$

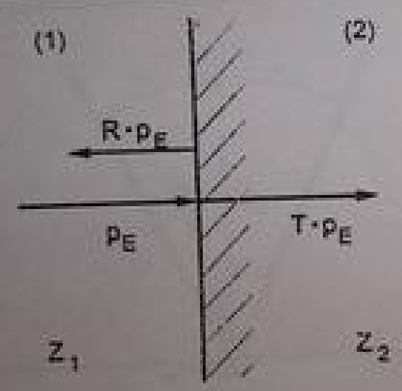


Fig. 2-20 Incidența normală a unei unde sonice pe o suprafață de separație

Prin urmare rezultă o reflexie aproape completă când Z_2 este mult mai mic decât Z_1, de ex. la suprafața de separație oțel/aer. Invers, R este aproape zero atunci când Z_1 și Z_2 sunt aproape egale. Semnul negativ înseamnă o inversare de fază la reflexie. Suprapresiunea este reflectată ca subpresiune și invers.

Dacă Z_2 este mai mare decât Z_1, de ex. la trecerea din apă în oțel, atunci presiunea sonică în mediul 2 este mai mare. Acest fapt nu contrazice principiul conservării energiei, deoarece raporturile energiilor se calculează prin intensitățile corespunzătoare, conform relației (2-11).

La trecerea sunetelor printr-o placă plan-paralelă cu grosimea d, sunetul este reflectat de mai multe ori înainte și înapoi. Părțile reflectate și transmise interferează, încât se ajunge la amplificări sau stingeri ale presiunii sonice în cazul unor raporturi bine stabilite între grosimea plăcii și lungimea de undă a sunetelor. Din această cauză factorii de reflecție R_p și de transmisie T_p ai unei astfel de plăci prezintă maxime și minime caracteristice. Fig. 2-21 prezintă aceste extreme pentru situațiile unor plăci de plexiglas, respectiv de aluminiu în apă [14]. Înălțimea și lățimea curbelor de transmisie depind de raportul rezistențelor acustice. Dacă rezistențele au valori egale, transmisia este egală cu 1 și nu depinde de frecvență. Din fig. 2-21 se poate deduce că un strat de separare între două medii trebuie să fie foarte subțire pentru ca ultrasunetele să poată fi transmise. Pentru o transmisie de 50%, un strat de aer în oțel ar trebui să fie de numai 10^{-6} mm, în vreme ce pentru un strat de apă este nevoie doar de o grosime de 0,02 mm. Acesta este motivul pentru care se folosesc straturi de ulei sau apă pentru cuplarea traductorilor ultrasonici, explicând totodată și de ce este așa dificilă cuplarea uscată. Maximul transmisiei unei plăci în cazul $d=\lambda/2$ din fig. 2-21 explică de altfel și condiția identică pentru frecvențele de rezonanță a oscilatorilor piezoelectrici, vezi rel. (2-2) din par. 2.1.2.

32

Situația se complică din alte motive atunci când o undă atinge oblic o suprafață de separație. În fig. 2-22 este prezentat cazul în care o undă longitudinală cu incidență oblică se despică într-o parte reflectată și una transmisă. În același mediu (1), *unghiul de incidență* α_{L1} și *unghiul de reflexie* β_{L1} sunt întotdeauna egale. *Unghiul de refracție* α_{L2}, sub care se propagă partea transmisă în mediul (2) a unei longitudinale, depinde doar de raportul vitezelor de propagare corespunzătoare. Dacă este vorba de corpuri

solide, atunci o parte din unda longitudinală incidentă se transformă în undă transversală. La naștere nu numai o undă transversală reflectată, ci și una transmisă, propagându-se sub unghiurile β_{T1} și α_{T2}. Raportul unghiurilor se aliniază întotdeauna raportului vitezelor de propagare, conform formulei:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \qquad (2\text{-}22)$$

Aceasta este *legea refracției* a lui Snellius. Ea posedă valabilitate generală, adică este valabilă pentru toate unghiurile (α,β) care apar și pentru toate tipurile de undă cu vitezele lor de propagare ($c_{L1}, c_{T1}, c_{L2}, c_{T2}$) în materialele corespunzătoare (1,2). Toate unghiurile sunt măsurate întotdeauna față de incidența perpendiculară. Legea reflexiei (2-20) reprezintă un caz special al legii refracției. În cazul incidenței oblice, relațiile de calcul a presiunilor sonice reale sunt totuși mai complicate decât relațiile (2-20), întrucât apare acum și o dependență unghiulară. Informații mai amănunțite despre aceasta se găsesc în [14,15].

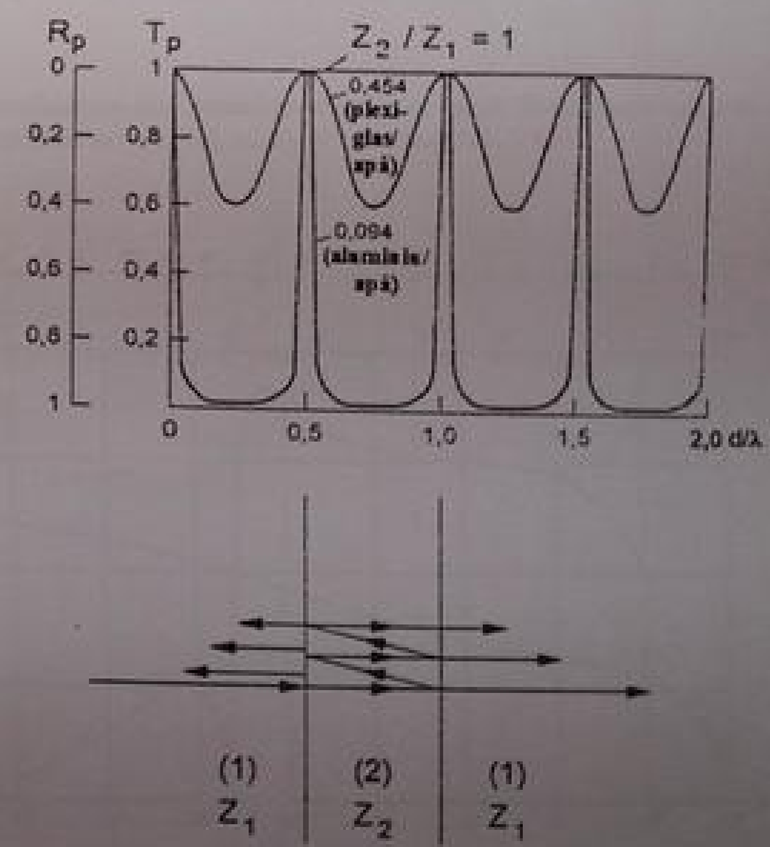


Fig. 2-21 Trecerea unei unde ultrasonice plane prin straturi de material

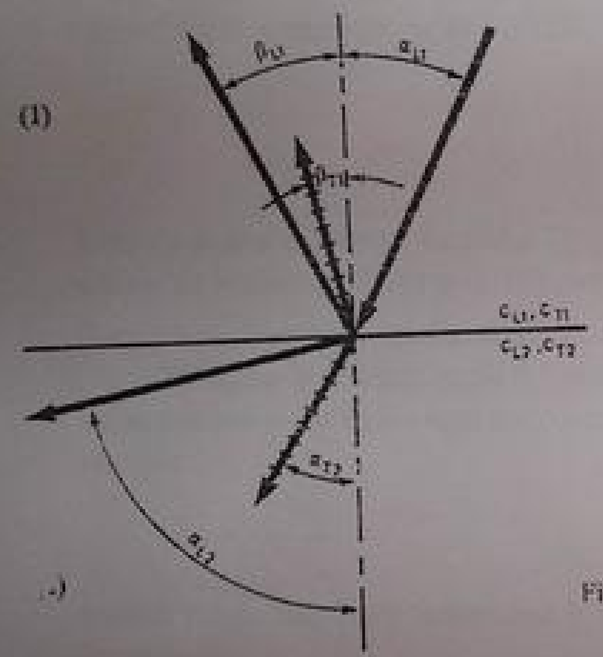


Fig. 2-22 Incidența înclinată a unei unde sonice pe o suprafață de separație

în oțel, viteza undelor transversale este doar cam jumătate din valoarea celei longitudinale, iar unghiurile β_{T1} și α_{T2} sunt de asemenea corespunzător mai reduse. Dacă unghiul α_{L1} al undei incidente primare este așa de mare încât din relația (2-22) rezultă $\sin \alpha_{L2}=1$ și deci $\alpha_{L2}=90°$, acesta este cazul limită al undei de fluaj sau scurgere (vezi par. 2.2). Când $\sin \alpha_{L2}$ devine numeric supraunitar, atunci în al doilea mediu există numai undă transversală sub unghiul α_{T2}. Dacă $\sin \alpha_{T2}=1$, atunci este suficientă doar o mică creștere a unghiului de incidență pentru a genera unda de suprafață.

Și o undă transversală incidentă se comportă în același mod. Este valabilă aceeași formulă (2-22). În locul noțiunii de *unghi de refracție*, în domeniul examinării materialelor se folosește de obicei denumirea de valoare egală *unghi de palpare* în material.

34

La despicarea undelor în cazul incidenței oblice pe suprafețe de separație, amplitudinile undelor reflectate longitudinale și transversale care apar sunt dependente de unghiul de incidență (fig. 2-23). Acest fapt are consecințe, de ex. în cazul examinării îmbinărilor sudate (vezi par. 3.4.1). Și amplitudinile undelor longitudinale și transversale transmise depind de direcția lor de propagare. Fig. 2-24 prezintă dependența pentru o undă longitudinală care se propagă în apă și atinge suprafața oțelului sub unghiul α_{L1}. Amplitudinea unui ecou după trecerea dublă (dus-întors) a suprafeței de separare este reprezentată în funcție de unghiul de incidență sau de refracție corespunzător. Unghiurile de refracție α_{L2} și α_{T2} corespunzătoare pot fi citite pe scalele superioare ale figurii. Această dependență unghiulară trebuie luată în considerație în cazul incidenței oblice la tehnica prin imersie.

Folosind principiul refracției sunetelor, câmpurile sonice pot fi focalizate (fig. 2-25 a). Un disc piezoelectric emite în materialul (1), apoi unda atinge suprafața de separare cu

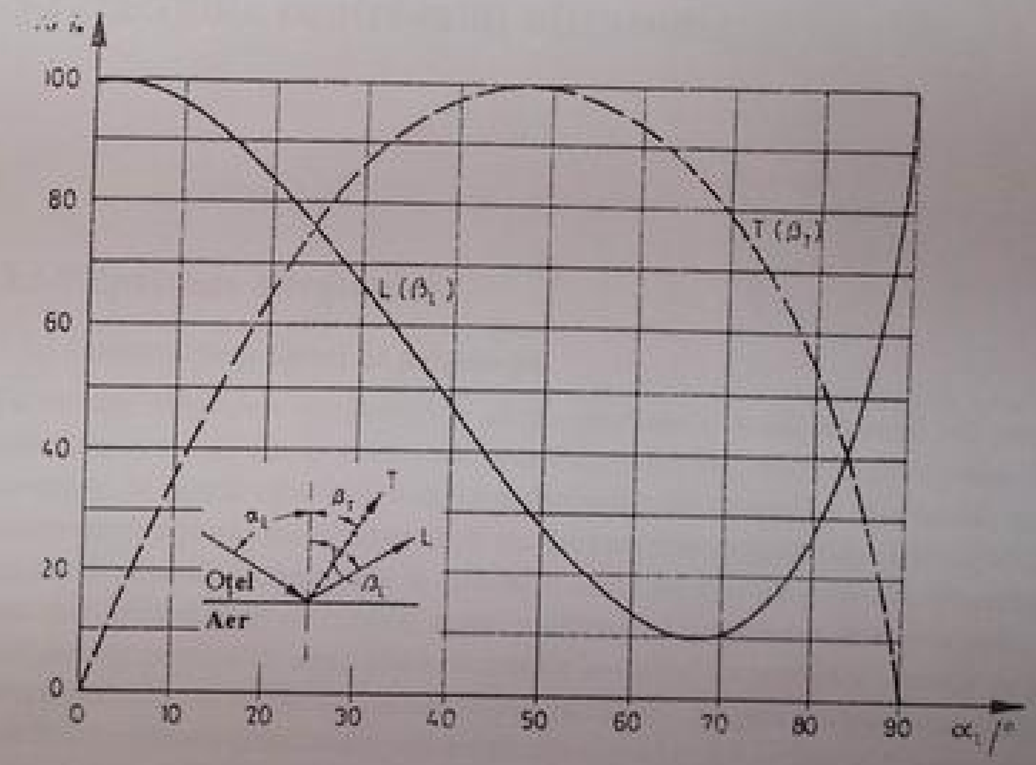


Fig. 2-23 Amplitudinea presiunii sonice a undei reflectate longitudinale (L) și transversale (T) în funcție de unghiul de palpare [19]. Maximul a fost stabilit la 100%.

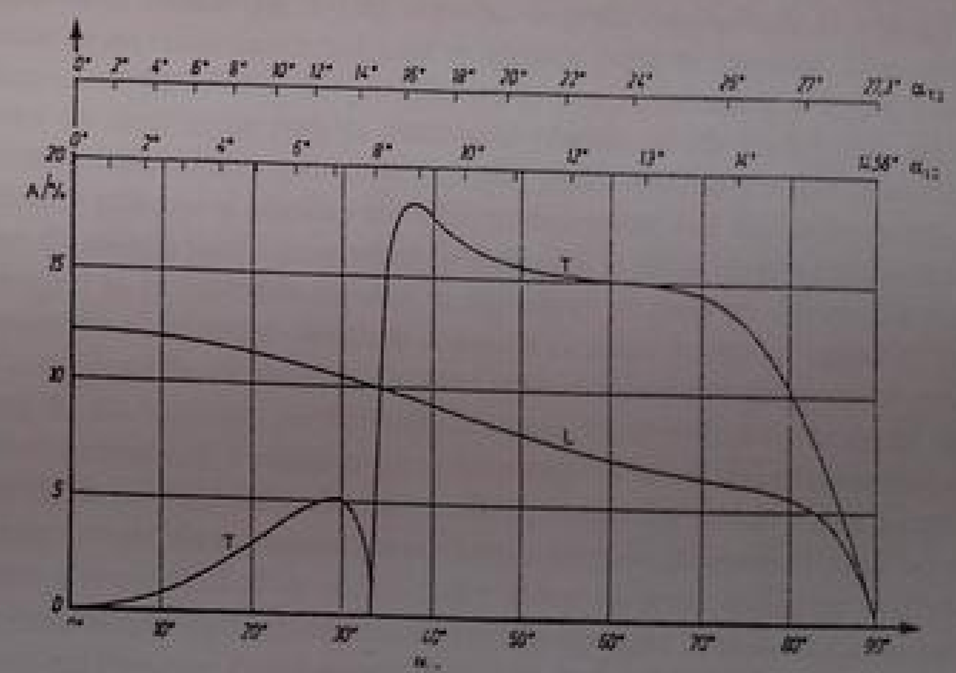


Fig. 2-24 Scăderea presiunii sonice A a unui ecou reflectat perpendicular în piesă (oțel) după trecerea de două ori a stratului de separație apă-oțel [15]

mediul (2), care este sferică sau cilindrică, cu raza de curbură r. Dacă $c_1 > c_2$, sunetele sunt refractate apropiindu-se de normală, încât razele se întâlnesc la distanța focală

$$F = \frac{r}{1 - \frac{c_2}{c_1}} \tag{2-23}$$

Relațiile pentru diametrul focarului D_1 și a factorului V_1 pentru creșterea presiunii sonice din formulele (2-18) și (2-19) sunt cu aproximație valabile și aici.

Dacă unda ultrasonică focalizată atinge o altă suprafață de separație cu mediul (3) (fig. 2-25 b), atunci distanța focală F_1', stabilită de la suprafața de intrare, se micșorează sau se mărește cu un factor egal aproximativ cu raportul vitezelor sonice, ajungând la valoarea

$$F_1 = F_1' \cdot \frac{c_2}{c_1} \tag{2-24}$$

Această relație este foarte importantă în practica controlului, prezentată în capitolele următoare.

Literatură suplimentară pentru această problemă: [6,18,19].

36

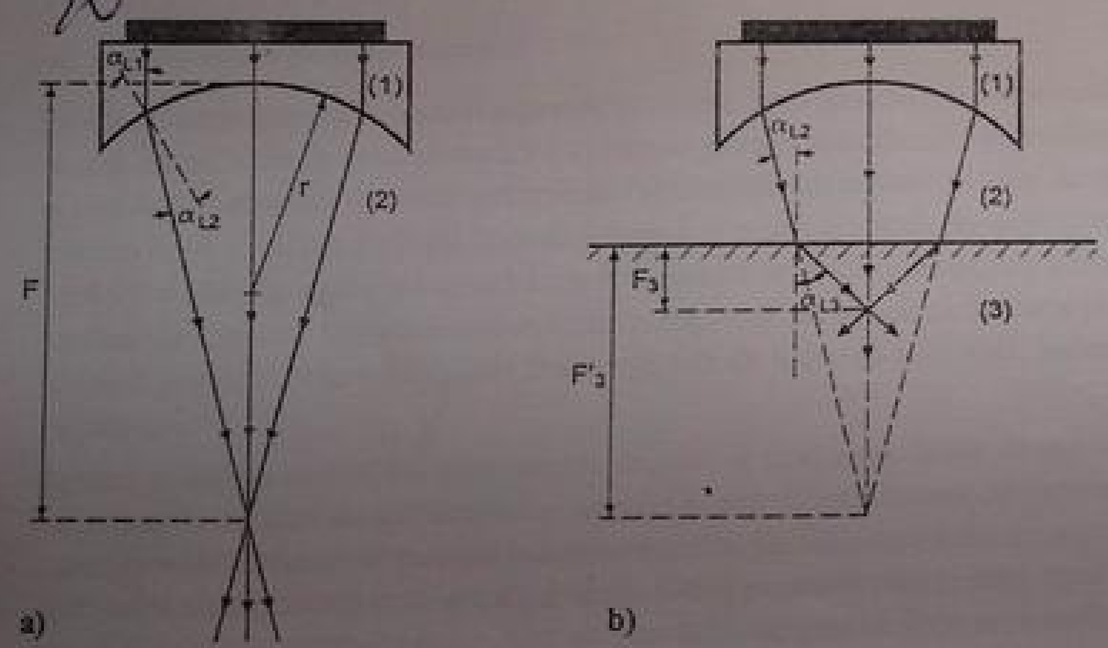


Fig. 2-25 Focalizarea prin refracția sunetelor
a) modul de acțiune al lentilelor
b) efectul unui material care refractă sunetele (3)

3 Principiile controlului ultrasonic

3.1 Palpatoare ultrasonice

3.1.1 Construcție și tipuri de palpatoare

Se numesc palpatoare *oscilatoarele ultrasonice* sau *senzori* adecvați atât pentru generarea (emisia) cât și pentru captarea (recepția) impulsurilor ultrasonice. Ele constituie, în cadrul tuturor metodelor nedistructive de control cu ultrasunete, cheia pentru rezolvarea sarcinii de control: de alegerea corectă a palpatorului depinde adesea dacă o piesă poate fi controlată. În special în cazul pieselor cu geometrie complicată sau cu condiții dificile de control, multe probleme se pot rezolva doar prin aceea că palpatoarele respective, adică comportarea lor în cadrul fenomenelor acustice, se pot adapta materialului respectiv sau condițiilor de control. Alegerea palpatorului adecvat este în orice situație hotărâtoare pentru calitatea și gradul de încredere al fiecărei decizii privind controlul.

Palpatoarele obișnuite funcționează astăzi aproape exclusiv după principiul efectului piezoelectric. Fig. 3-1 prezintă construcția de bază a patru tipuri principale. În cazul *palpatorului normal* (fig. 3-1 a), impulsul de unde longitudinale se propagă perpendicular pe suprafața de contact, care se așază pe piesa de controlat. Elementul piezoelectric, care transformă energia electrică în energie mecanică și invers, este lipit în partea din spate de un corp de amortizare adaptat pe cât posibil, care amortizează oscilațiile traductorului și absoarbe radiațiile sonice emise spre înapoi de acesta. Stratul frontal de protecție și adaptare are rolul, pe de o parte, de a face ca o cantitate cât mai mare din energia sonică generată să fie transmisă în piesă, iar pe de altă parte evită ca palpatorul să fie deteriorat mecanic la deplasarea pe piese cu suprafețe în majoritate rugoase sau să fie atacat chimic la contactul cu medii de cuplare agresive. Stratul de protecție constă fie din materiale ceramice sau metaloceramice dure (*straturi protectoare dure*), fie din materiale plastice (*straturi protectoare moi*), amestecate de regulă cu pulberi ceramice, în vederea creșterii rezistenței la uzură. Palpatoarele prevăzute cu strat dur de protecție sunt adecvate cuplării pe suprafețe netede. Palpatoarele cu strat protector moale oferă o transmitere mai bună a sunetelor în piesele cu suprafață rugoasă. Pentru a le proteja față de o deteriorare mecanică prea rapidă, ele sunt prevăzute suplimentar cu folii protectoare din material plastic ce pot fi înlocuite. Cauza transmisiei sonice mai bune prin suprafețe rugoase rezultă din potrivirea favorabilă a impedanțelor lichidului de cuplare și a stratului protector din material plastic. În cazul suprafețelor cu rugozitate mare, interstițiul umplut cu fluid de cuplare dintre palpator și piesă este

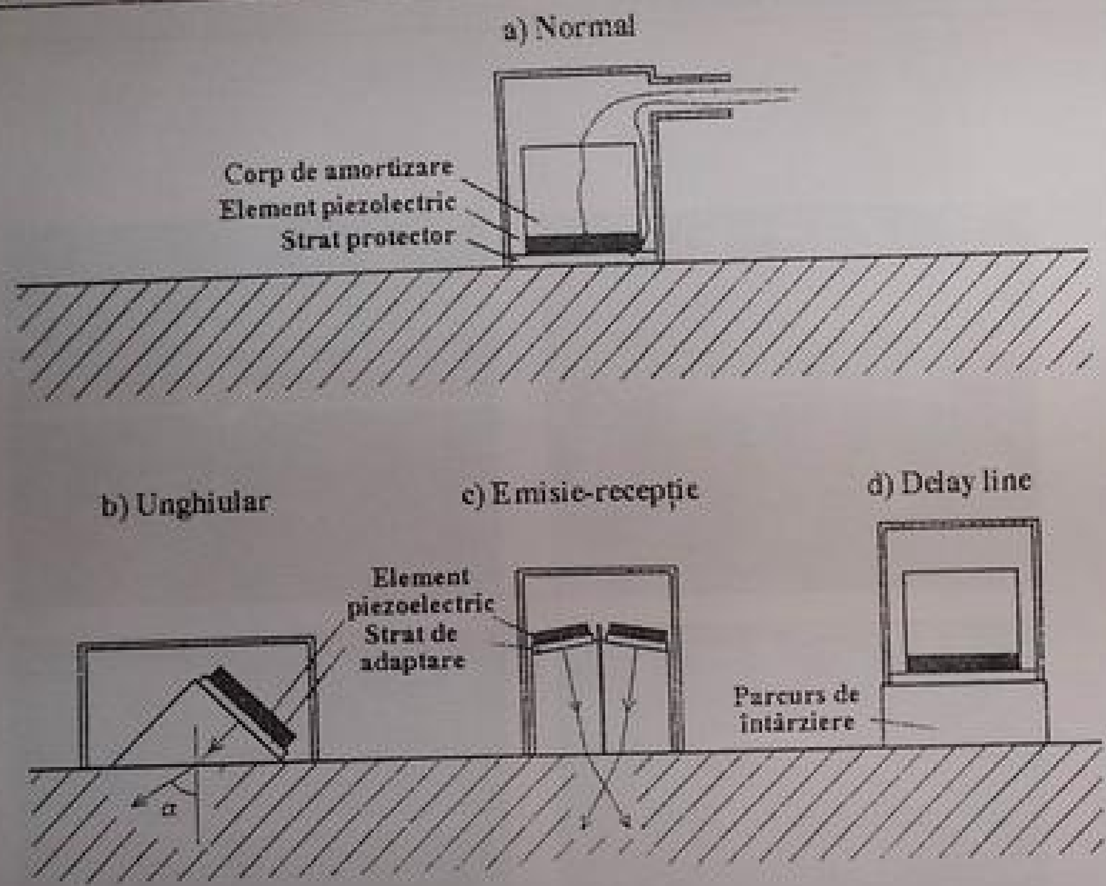


Fig. 3-1 Construcția palpatoarelor ultrasonice

întotdeauna mai gros decât în cazul suprafețelor netede. Spre deosebire de palpatoarele cu strat protector dur, în cazul straturilor moi nu apar pierderi semnificative prin reflexie la suprafața de separație dintre stratul protector și interstițiul de cuplare. În locul acestei pierderi apare o reflexie multiplă, înainte și înapoi, în stratul moale de protecție dintre oscilator și piesa cu impedanță acustică mare. Grosimile stratului de protecție și a foliei suplimentare aplicate formează deci un filtru de frecvență, ele trebuie să fie foarte bine adaptate pentru a evita modificările frecvenței față de *valoarea nominală*, indicată pe palpator.

Forma oscilațiilor semnalului palpatorului depinde în mod semnificativ de raportul impedanțelor acustice ale oscilatorului și corpului de amortizare. Dacă ele sunt aproape egale, se vorbește despre un palpator puternic amortizat. Oscilația unui astfel de palpator este foarte scurtă, adesea este formată doar din câteva sinusoide care se sting rapid. În cazul impulsurilor extrem de scurte, care constau dintr-o singură oscilație sau o oscilație și jumătate, se vorbește despre *unde de șoc*. *Spectrul de frecvență* aferent este puternic extins în jurul frecvenței fundamentale de oscilație. Astfel de palpatoare sunt denumite palpatoare de *bandă largă*. Atunci când corpul de amortizare este mai puțin adaptat din punct de vedere al impedanței, forma oscilațiilor devine mai lungă, iar spectrul de frecvență mai îngust. Fig. 3-2 explică relațiile pentru palpatoarele

puternic, mediu și slab amortizate. Forma oscilației și sensibilitatea depind și de existența în carcasa palpatorului a unui montaj electric al oscilatorului. Acesta poate acționa ca sistem de adaptare electrică față de sistemul electronic de evaluare și ca filtru de frecvență.

Drept lățime de bandă Δf se consideră diferența dintre frecvența cea mai înaltă (f_o) și frecvența cea mai joasă (f_u). Acestea sunt frecvențele la care valoarea amplitudinii spectrului este redusă cu 6dB.

$$\Delta f = f_o - f_u \qquad (3\text{-}1)$$

Pentru caracterizarea palpatoarelor mediu și slab amortizate se definește frecvența medie a spectrului real măsurat al palpatorului:

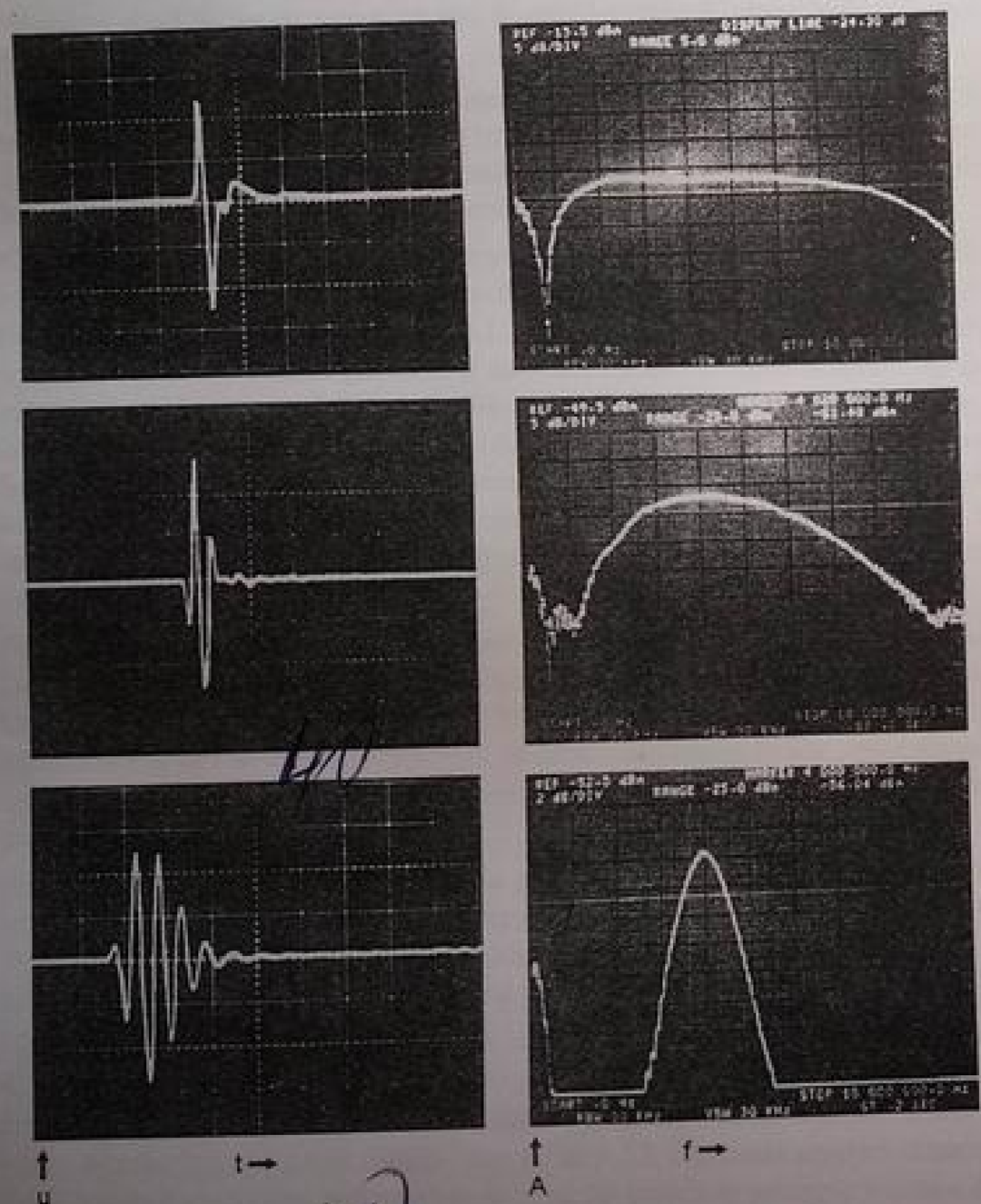
$$f_m = \sqrt{f_u \cdot f_o} \qquad (3\text{-}2)$$

Adesea, în locul lățimii de bandă în MHz, este indicată lățimea relativă de bandă Δf_{rel}, în procente:

$$\Delta f_{rel} = \frac{f_o - f_u}{f_m} \qquad (3\text{-}3)$$

Definițiile (3-1) la (3-3) corespund recomandării de normă europeană CEN/TC138/WG2 N176 privind palpatoarele ultrasonice, precum și vechii norme germane DIN 25450, ambele conținând cerințe și metode de măsurare a caracteristicilor palpatoarelor ultrasonice. Totuși, în DIN 25450, frecvențele limită superioară și inferioară sunt definite prin -3dB.

La *palpatorul unghiular* (fig. 3-1 b), la care sunetul pătrunde în piesă sub un unghi prestabilit, și la *palpatorul emisie-recepție* (S-E) (fig. 3-1 c), care constă din elemente separate de emisie și de recepție ale căror caracteristici acustice de emisie și recepție se suprapun doar în piesă, elementul piezoelectric este dispus în carcasa palpatorului pe o pană auxiliară, confecționată de obicei din plexiglas, polistiren sau alt material plastic bun transmițător de sunete. Între oscilator și pană se găsește un strat de adaptare acustică, a cărui impedanță acustică se află între valorile corespunzătoare elementului piezoelectric și cea corespunzătoare penei și a cărui grosime corespunde unui sfert din lungimea de undă (*strat λ/4*). Aceasta permite pe de o parte o transmisie bună a sunetelor de la elementul piezoelectric în pana auxiliară, dar produce pe de altă parte și o puternică amortizare mecanică a elemenului oscilator, fapt ce conduce la o oscilație scurtă și o lărgime considerabilă de bandă pentru palpatorul respectiv. Din această cauză, la palpatoarele unghiulare și la palpatoarele emisie-recepție nu este de regulă folosit corpul de amortizare posterior, ci doar când sunt necesare forme de oscilație similare undelor de șoc. Astfel de forme sunt necesare în general doar la măsurătorile de grosime, iar în domeniul căutării defectelor, doar când materialul examinat este puternic absorbant sau generează împrăștiere sonică mare. La ambele tipuri de palpatoare, unghiulare și cu emisie-recepție,



40

Fig. 3-2 Pentru explicarea formei oscilației (sus), a spectrului și lățimii de bandă (jos)
a) undă de șoc, lățime de bandă extrem de mare, amortizare puternică
b) formă de impuls scurt, lățime mare de bandă, amortizare medie
c) formă de impuls largă, lățime redusă de bandă, amortizare mică

sunt necesare măsuri constructive speciale pentru evitarea reflexiilor nedorite în carcasa palpatorului. La palpatoarele emisie-recepție, între cele două părți se află un strat de separare, pe cât posibil netransmițător acustic, denumit *și baraj sonic*. Prin acest mod de construcție, emițătorul și receptorul devin independente și electric și acustic, adică nu se influențează semnificativ.

O formă mixtă din palpatoare unghiulare și palpatoare SE îl reprezintă așa-numitul *palpator unghiular emisie-recepție*. Construcția lui corespunde celei a unui palpator emisie-recepție. Suplimentar, cele două elemente piezoelectrice sunt înclinate într-un plan perpendicular pe planul desenului din fig. 3-1 c, astfel ca direcția fasciculului de intrare sau ieșire din piesă să se facă sub unghiuri corespunzătoare, similar situației de la palpatoarele unghiulare.

Pentru palpatoarele normale cu parcurs suplimentar se folosește des denumirea de *palpator cu linie de întârziere*. Construcția acestuia (fig. 3-1 d) corespunde celei pentru palpatorul normal. Sunetele sunt transmise în piesă printr-un *parcurs de întârziere* (Delay-Line), de regulă dintr-un material plastic cu bună conductibilitate acustică. Acest parcurs suplimentar poate fi lipit cu oscilatorul și cu stratul de adaptare sau poate fi făcut să se înșurubeze și deci să poată fi schimbat. Întârzierea datorată parcurgerii acestei porțiuni până când fasciculul ajunge în piesă are ca efect stingerea tuturor fenomenelor de supraexcitație din aparatul ultrasonic cauzate de impulsul electric de pornire a emisiei. Se realizează astfel o *rezoluție de apropiere* bună. Astfel se definește capacitatea unui palpator de a separa reflexiile sonice provenite din domenii imediat sub suprafața unei piese. Din contră, capacitatea de separare a reflexiilor de la distanțe mari, dar foarte apropiate în timp, este *rezoluția la distanță*.

Palpatoarele se deosebesc între ele în funcție de utilizarea lor și prin dimensiuni, frecvență, lățime de bandă și tip de construcție. Fig. 3-3 prezintă câteva forme tipice. în stânga palpatoare normale pentru controlul manual, în mijloc palpatoare unghiulare, în dreapta palpatoare etanșe la apă pentru folosirea la *tehnica prin imersie*.

Fig. 3-3 Palpatoare pentru diferite aplicații

Tehnica prin imersie desemnează tehnica prin care piesa este introdusă, parțial sau total, într-un fluid în care se găsesc palpatoarele. Din această cauză carcasa și jonțiunea cablului electric trebuie realizate etanș. Deoarece palpatoarele de acest tip nu se așază manual pe piesă, forma lor exterioară este de regulă cilindrică, pentru a putea fi ușor fixat în dispozitive corespunzătoare.

Structura lor este similară celei a palpatoarelor normale. Pentru adaptarea mai corectă în apă, palpatoarele în imersie dispun de straturi de protecție și de adaptare din material plastic. Adesea sunt prevăzute și cu lentile suplimentare de focalizare. Palpatoarele în imersie se pot utiliza pentru palpări normale sau înclinate.

Fig. 3-4 prezintă schematic câmpurile sonice generate într-o piesă de diferite tipuri de palpatoare. Palpatoarele normale posedă de obicei oscilatoare circulare. Câmpul acestora (fig. 3-4 a) a fost descris deja în par. 2.3.2. Palpatoarele unghiulare sunt echipate de regulă cu oscilatoare dreptunghiulare. O parte din câmpul apropiat al acestui tip de palpatoare este deja conținută de pana suplimentară. Din cauza fenomenului de refracție, în cazul unghiurilor mari, razele laterale și de aici și unghiurile θ_1 și θ_2, raportate la axa fasciculului sonic, nu mai sunt perfect simetrice (fig. 3-4 b). Cu creșterea mărimii oscilatorului, crește lungimea câmpului apropiat și scade deschiderea unghiulară a fasciculului. Această constatare face palpatoarele mari adecvate controlului pieselor mari și invers.

Palpatoarele unghiulare pot genera în piese unde longitudinale și unde transversale. De obicei se alege unghiul de incidență astfel ca în piesă să existe doar unda transversală. Obișnuite sunt unghiurile 35°, 45°, 60°, 70° și 80°. Aceste valori se referă la unda transversală în oțel cu viteza c_t=3255m/s. În cazul materialelor cu alte viteze sonice, unghiul de incidență se calculează conform legii refracției, vezi rel. (2-22) sau se determină din fig. 3-129. 42

Domeniul de lucru al palpatoarelor SE se găsește acolo unde câmpurile sonice ale emițătorului și receptorului în piesă se suprapun (fig. 3-4 c). El poate fi modificat în limite largi prin alegerea adecvată a unghiului format de cele două oscilatoare (unghi de acoperiș), a distanței dintre oscilatoare și a lungimii parcursului de întârziere.

Palpatoarele SE sunt descrise întotdeauna, în afară de frecvență, și printr-o diagramă distanță-sensibilitate, din care rezultă curba sensibilității pe axă (fig. 3-5). În practică, diagrama completă conține curbe de sensibilitate pentru un perete de fund plan și pentru o serie de reflectori de tip disc circular, vezi și par. 3.4.3. Din cauza separării electrice dintre emițător și receptor, palpatoarele de acest tip posedă în principiu o putere de separare la apropiere ridicată, totuși un unghi de acoperiș mic dă naștere unei zone moarte imediat sub suprafața piesei, mai scurtă sau mai lungă, în vreme ce un unghi de acoperiș mai mare are ca efect apariția unei erori de ocolire mai mare, vezi par. 3.4.2.1.

Pentru alegerea corectă a palpatorului, este oportun următorul procedeu (vezi par. 3.4.1 și [6,15]): frecvența de control ar trebui să fie aleasă cât mai înaltă posibil, pentru a

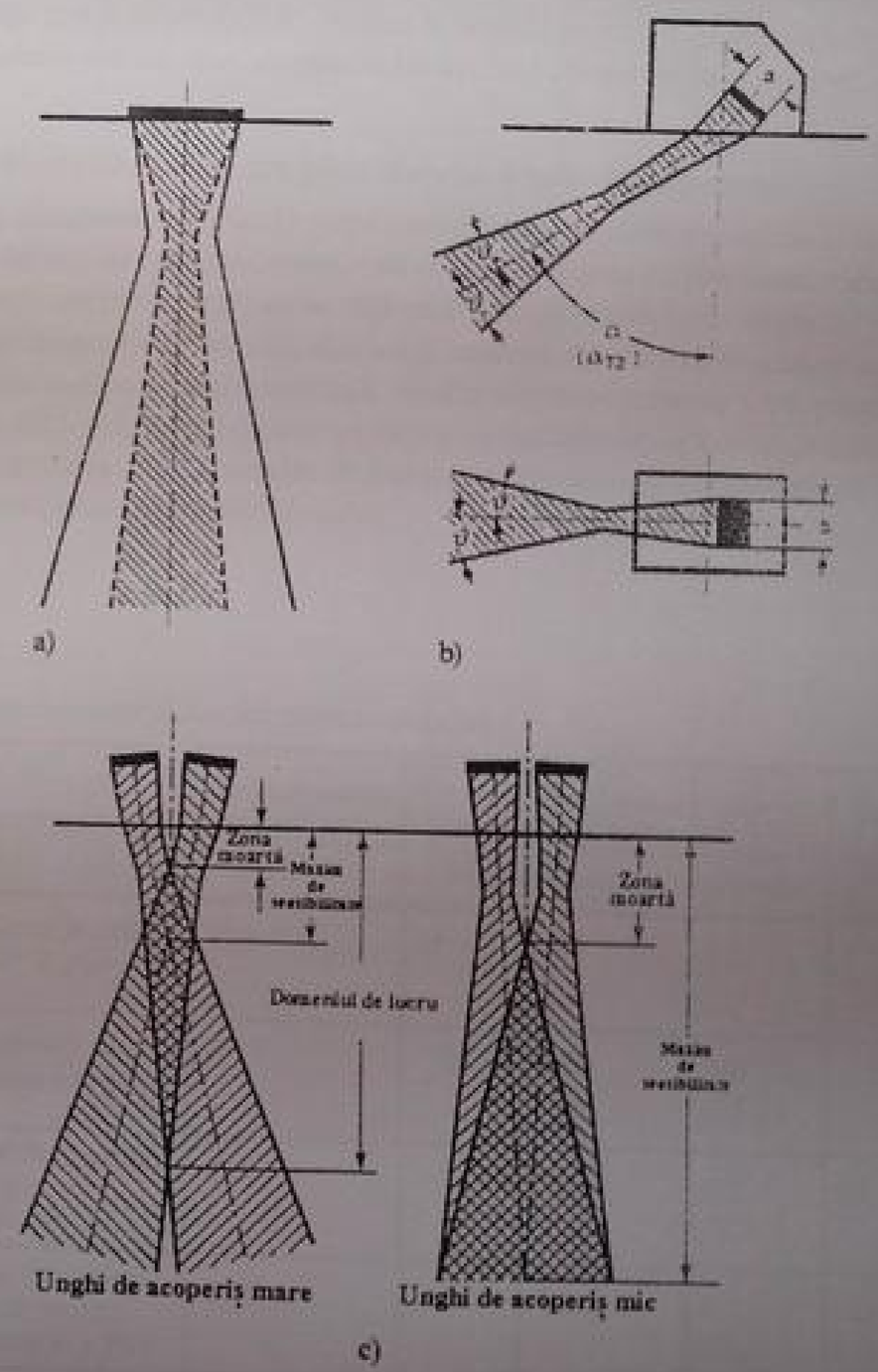


Fig. 3-4 Câmpuri sonice ale palpatoarelor (schematic)
a) palpator normal
b) palpator unghiular
c) palpator emisie-recepție

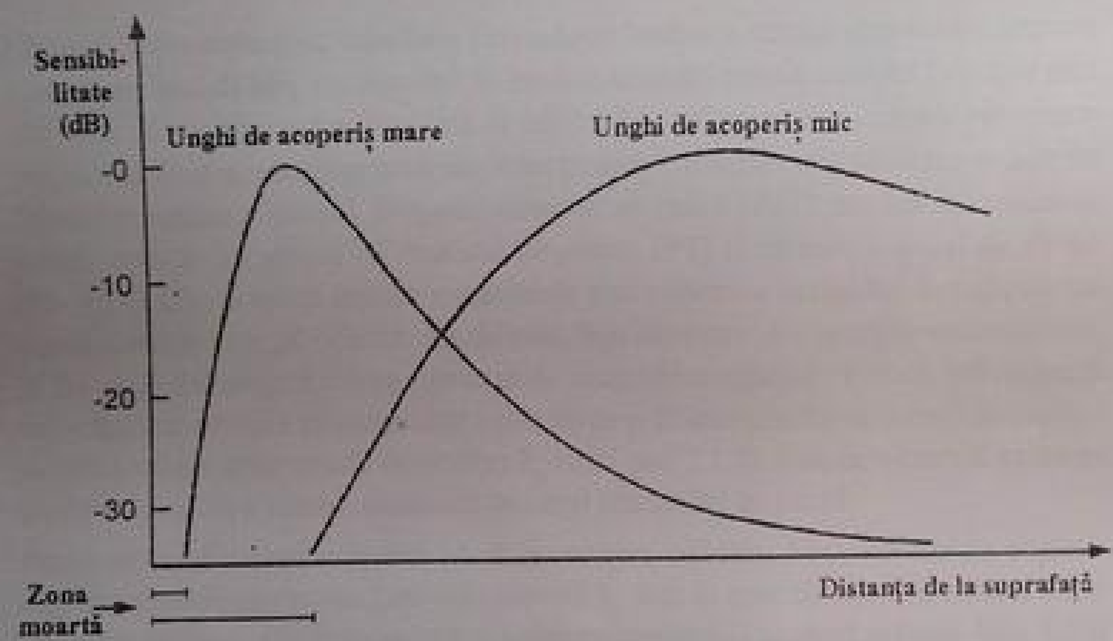


Fig. 3-5 Curba sensibilității în cazul palpatoarelor emisie-recepție

furniza cea mai ridicată sensibilitate de detectare a defectelor mici, totuși destul de scăzută pentru ca distanța semnal-zgomot pe care o admite materialul examinat să fie destul de ridicată. În caz de dubiu se asociază o piesă de verificare prevăzută cu un orificiu care corespunde defectului limită necesar a fi detectat. Dacă reflexia de la acest orificiu dispare în zgomotul de structură la o anumită frecvență de control, atunci trebuie aleasă o frecvență mai scăzută.

Unghiul de palpare trebuie astfel ales încât suprafața defectelor ce trebuie detectate să fie atinsă de fascicul pe cât posibil perpendicular (vezi și figura 3-69). Poate fi oportună repetarea controlului cu mai multe unghiuri de palpare. Într-o astfel de situație, trebuie să se țină seama de faptul că fasciculul sonic are divergența variabilă, în funcție de lungimea de undă și de dimensiunea oscilatorului.

Cu tot numărul mare de palpatoare diferite, existente pe piață, unele probleme de control se pot rezolva doar cu *palpatoare speciale*, construite anume pentru problema respectivă. Cauza pentru această situație o reprezintă adesea condițiile obiective în care trebuie efectuat controlul, ca de ex. proprietățile fizice nefavorabile ale materialului, prescripțiile excepționale de control, de obicei chiar numai o geometrie deosebit de complicată sau un acces îngreunat la piesa de control. Prin confecționarea de palpatoare speciale, se oferă adesea posibilități tehnice de rezolvare a unor probleme de control care în prima fază par nerealizabile cu palpatoare obișnuite.

Producerea palpatoarelor speciale este posibilă de cele mai multe ori doar printr-o strânsă colaborare și prin dialog între utilizator și fabricant. Utilizatorul, care este familiarizat cu problema de control și cu condițiile limită, știe în ce locuri sunt posibile

compromisuri în tehnica de folosire, în vreme ce fabricantul de palpatoare cuprinde întreaga gamă de posibilități tehnice în această ramură și poate apela la experiența multiplelor sisteme speciale asemănătoare, ca și a nenumăratelor aplicații apropiate.

3.1.2 Materiale oscilatoare piezoelectrice folosite la palpatoare

Pentru generarea sunetelor în palpatoare ultrasonice există astăzi o serie de materiale piezoelectrice de mare randament, care se deosebesc între ele prin caracteristicile fizice. În funcție de problema la care se utilizează și de proprietățile dorite pentru palpator, o dată este avantajos un material, altă dată alt material, atât din motive acustice sau tehnice, cât și din motive de prelucrabilitate sau din motive economice. Cunoștințele despre forța și slăbiciunea fiecărui material utilizat ca oscilator fac ușor de înțeles comportarea palpatoarelor în condiții stabilite de funcționare sau de cuplare și ușurează de la început alegerea tipului adecvat de palpator.

Tabelul 3-1

Proprietățile materialelor folosite ca oscilatoare

Proprietate	Zirconat-titanat de plumb, PZT - 5	Titanat de Pb, PT	Metaniobat de Pb, $PbNb_2O_6$	PVDF (co-polimeri)	Material compozit 1-3
Impedanța acustică Z [10^6 Kg/m²·s]	33,7	33	20,5	3,9	9
Frecvența de rezonanță f [MHz]	< 25	< 20	< 30	160-10 (55-2)	< 10
Factor de cuplare pentru oscilații de grosime k_t[%]	0,45	0,51	0,30	0,2 (0,3)	0,6
Factor de cuplare pentru oscilații transversale k_p[%]	0,58	< 0,01	< 0,1	0,12 (k_{31})	≈0,1
Constanta dielectrică relativă, ε	1700	215	300	10	450
Temperatura maximă [°C]	365	350	570	80	100

Materialele piezoelectrice folosite în perioada de început a tehnicii ultrasonice, precum cuarțul, sulfatul de litiu sau titanatul de bariu sunt astăzi practic complet înlocuite prin alte materiale cu eficiență mai ridicată. În tabelul 3-1 sunt prezentate cele mai importante proprietăți fizice pentru generarea sunetelor pe care le posedă materialele piezoelectrice folosite în perioada actuală. *Zirconat-titanatul de plumb* (PZT) este cel mai cunoscut printre acestea. Împreună cu *titanatul de plumb* (PT) și cu *metaniobatul de plumb* ($Pb\ Nb_2O_6$), se numără printre materialele piezoelectrice ceramice. Impedanța lor acustică este în general ridicată, dar diferită, fapt important din punct de vedere tehnic, la fel ca și diferențele dintre constantele dielectrice relative ε - ele influențează capacitatea electrică a palpatoarelor - și la fel ca și diferențele dintre factorii de cuplare pentru oscilații transversale (nedorite) k_p (vezi par. 2.1.2). Este de observat valoarea destul de scăzută a acestei constante în cazul titanatului de plumb.

Piezoceramicile sunt utilizate până la maxim 30MHz. Factorul lor de cuplare electromecanică pentru oscilații ale grosimii k_t este în general mare. În cazul emisiei sunetelor în fluide sau în materiale plastice cu impedanță acustică scăzută, între 1.5 și $3x10^6$ Kg/m^2s, apar pierderi semnificative prin reflexie chiar la limita de separație cu mediul de propagare, încât doar o fracțiune din energia sonică generată ajunge în materialul de examinat. Materialele plastice piezoelectrice ca PVDF (fluorură de polivinil) sau copolimeri înrudiți se adaptează mai bine în acest caz, datorită impedanței lor sonice mai scăzute. În afară de aceasta, astfel de materiale sunt mecanic mai flexibile și pot fi folosite și la frecvențe înalte, până la 160 MHz. Din păcate ele sunt mai puțin sensibile decât ceramicile și se pot utiliza până la 80°C. Peste această temperatură, aceste substanțe își pierd capacitatea de piezoelectricitate.

S-a dovedit că însemnătatea *materialelor compozite* 1-3[20,21,22] este în creștere. La impedanțe acustice relativ scăzute, ele posedă un grad de eficiență k_t pentru oscilații de grosime extraordinar de mare. De altfel ele constituie o structură intermediară între ceramicile piezoelectrice și polimeri. Este vorba aici de mici bare de ceramică orientate paralel, de obicei PZT puternic comprimat, care sunt încorporate într-o matrice de

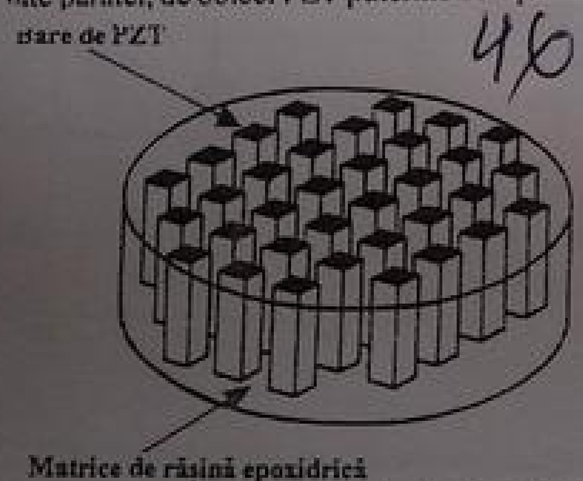


Fig. 3-6 Construcția traductoarelor cu materiale piezoelectrice compozite 1-3

rășină epoxidrică (fig.3-6). De aici rezultă densitatea redusă și impedanța acustică mică. Elementele compozite piezoelectrice 1-3 sunt, într-o măsură limitată flexibile mecanic. Domeniul de temperatură este și aici limitat superior la cca. 100°C. Peste această valoare apar în rășina epoxidrică fenomene de contracție și descompunere, iar elementele oscilante își pierd stabilitatea mecanică. Prin alegerea piezoceramicii, a rășinii pentru turnare și a dimensiunilor geometrice ale barelor și spațiilor intermediare, proprietățile piezomaterialului compozit pot fi modificate în limite largi. Din cauza metodelor costisitoare de fabricație, compozitele 1-3 sunt foarte scumpe. Din motive economice, introducerea lor în utilizare nu intră în discuție acolo unde tradiționalele palpatoare ceramice furnizează deja rezultate satisfăcătoare.

3.1.3 Utilizarea materialelor piezoelectrice în palpatoare

Printre piezoceramici, *metaniobatul de plumb* posedă impedanța acustică cea mai redusă (vezi tabelul 3-1). De aceea, dintre toate piezoceramicile, el este cel mai simplu de amortizat mecanic. Corpurile de amortizare constau din amestecuri de pulberi din metale grele și de materiale plastice. Cu cât este mai înaltă impedanța acustică a materialului oscilant folosit, cu atât mai mare trebuie să fie procentul de metal greu din corpul de amortizare, iar confecționarea acestuia devine cu atât mai dificilă și mai costisitoare. Metaniobatul de plumb este deci deosebit de adecvat pentru construcția palpatoarelor de rezoluție înaltă, cu impulsuri extrem de scurte, similar cu palpatourele cu PVDF, la care corpul de amortizare constă doar dintr-un material plastic absorbant. Fig. 3-7 prezintă impulsurile scurte ale palpatoarelor puternic amortizate cu metaniobat de plumb și cu PVDF, pentru tehnica prin imersie. La aceeași frecvență și același diametru al oscilatorului, palpatoarele pentru imersie cu bandă largă (unde de șoc) din PVDF și metaniobat de plumb au sensibilitatea aproximativ egală.

Pentru palpatoarele cu unde de șoc pentru cuplare directă pe oțel sau pe alte materiale metalice sau ceramice, doar metaniobatul de plumb intră în discuție, datorită adaptării impedanței la aceste materiale solide. Fig. 3-8 arată forma oscilațiilor unui palpator de 5 MHz din metaniobat de plumb, cu diametrul oscilatorului de 6 mm.

Impedanța relativ scăzută a metaniobatului de plumb este folositoare de asemenea și pentru palpatoarele unghiulare și cu emisie-recepție, cu lățime mărită de bandă. Cu cât sunt mai apropiate impedanțele acustice ale oscilatorului și penei suplimentare, cu atât mai mult acționează pana însăși ca amortizor mecanic al elementului oscilator. Se manifestă în plus și efectul stratului de adaptare. Dacă impedanța acustică a acestuia, Z_A, satisface relația

$$Z_A=\sqrt{(Z_K \cdot Z_V)} \qquad (3\text{-}4)$$

în care Z_K și Z_V sunt impedanțele acustice ale oscilatorului și penei suplimentare, atunci transferul de energie este maxim. Fig. 3-9 prezintă forma oscilațiilor și spectrul unui palpator unghiular de 4MHz. Toate palpatoarele unghiulare și cu emisie-recepție utilizabile în această etapă prezintă o comportare asemănătoare.

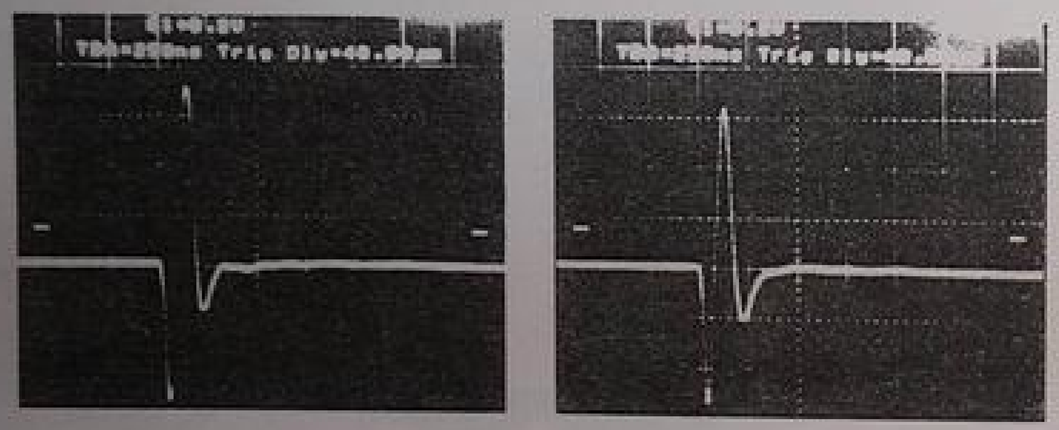
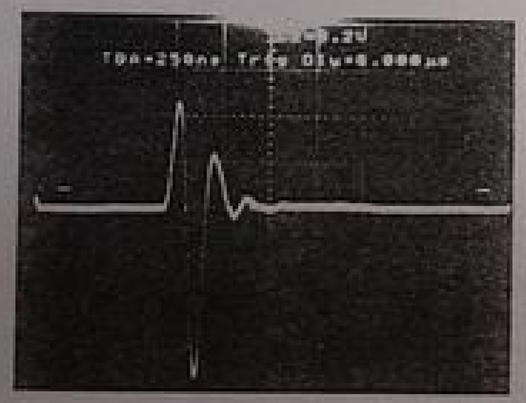


Fig. 3-7 Comparație a formelor pulsurilor: palpatoare pentru tehnica prin imersie cu caracteristica undei de șoc din PVDF (stânga) și metaniobat de plumb (dreapta)



48

Fig. 3-8 Forma pulsului unui palpator cu unde de șoc pentru contact direct (6 mm, 5 MHz)

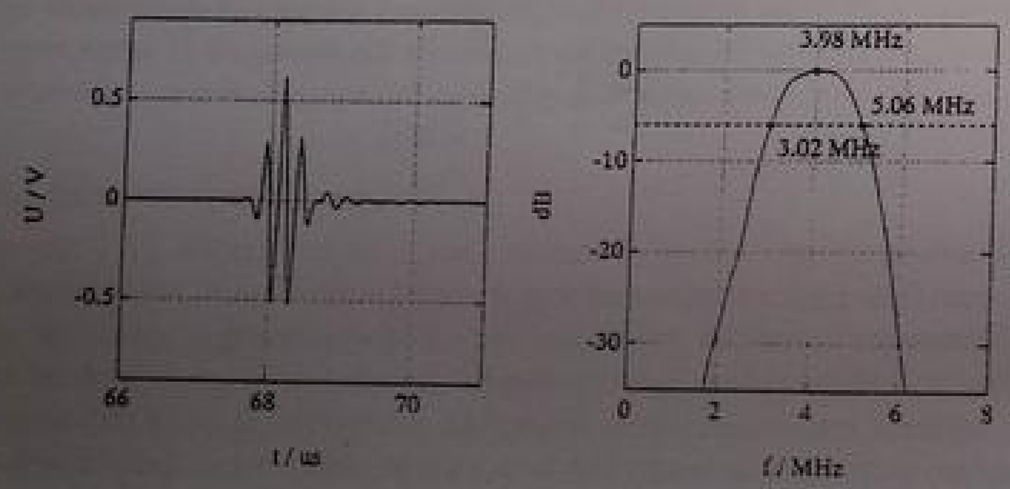


Fig 3-9 Forma pulsului și spectrul unui palpator unghiular (9 x 8 mm, 4 MHz) cu strat de adaptare

Titanatul de plumb este des folosit când sunt necesare dimensiuni reduse ale oscilatorului, întrucât nu apar nici un fel de oscilații transversale parazite și deranjante. Acestea ar avea ca urmări distorsiuni ale formei semnalului, deviații ale frecvenței și porțiuni de semnal de frecvență joasă, perturbatoare. În cazul pieselor cu dimensiuni mari este vorba de intensități sonice pe cât posibil ridicate. În această situație se folosește *zirconat - titanatul de plumb* (PZT). Pentru controlul materialelor cu împrăștiere sonică puternică, ca betonul sau grafitul, sunt necesare frecvențe de control de până la 40KHz. Pentru mărirea sensibilității, în locul unui oscilator cu grosimea d se folosesc adesea mai multe elemente așezate unul peste altul, conectate în paralel, în număr de n și cu grosimea individuală d/n (fig. 3-10). La aceeași tensiune de emisie, presiunea sonică generată de pachetul piezoelectric este de n ori mai mare.

Cu foliile piezoelectrice din PVDF, emisia sonică eficientă este posibilă doar în apă sau în materiale plastice. PVDF este deci adecvată pentru palpatoarele de înaltă frecvență cu linie de întârziere sau pentru cele folosite în tehnica prin imersie. PVDF se poate folosi și la frecvențe mai scăzute, utilizându-i flexibilitatea mecanică la palpatoare în imersie cu focalizare lineară [23,24,25] și cu suprafața perfect cilindrică (fig. 3-11).

Piezo - compozitele 1-3, din cauza impedanței lor acustice, sunt adecvate de asemenea numai pentru emisia sonică în fluide și materiale plastice. Corpurile de amortizare necesare trebuie doar să fie umplute potrivit. Se pot fabrica astfel palpatoare de bandă largă pentru tehnica prin imersie. Sensibilitatea lor este mai ridicată decât la palpatoarele piezoceramice. În cazul palpatoarelor unghiulare și a celor cu emisie- recepție este descori suficientă lipirea unui piezocompozit 1-3 pe pana suplimentară

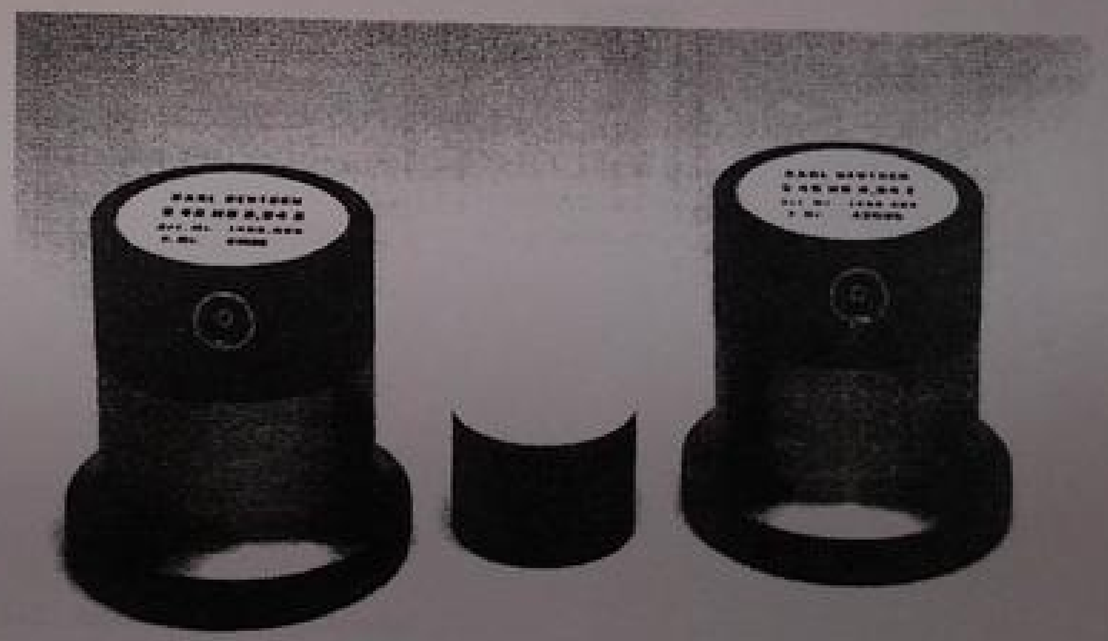


Fig. 3-10 Palpatoare de frecvență scăzută (emițător/receptor) folosind pachete de elemente piezoelectrice

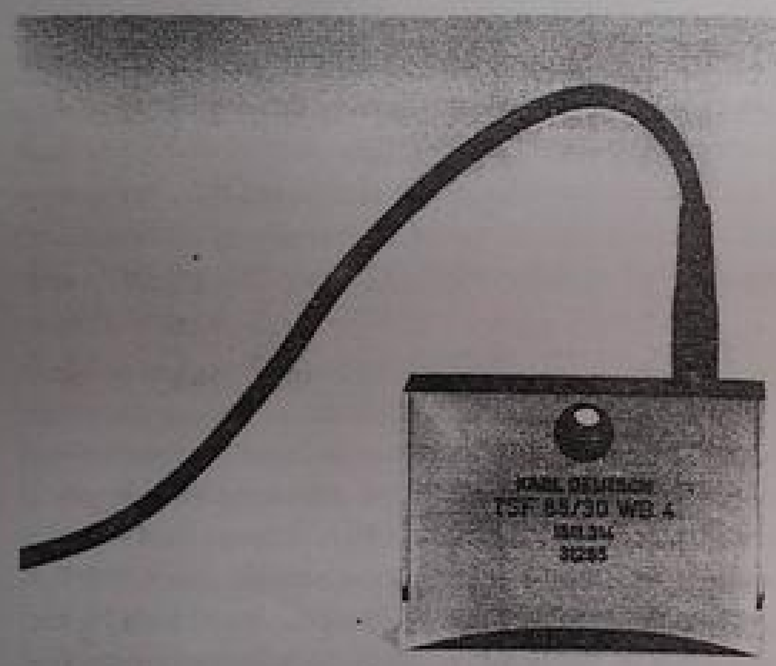


Fig. 3-11 Pal[illegible]entru tehnica prin imersie cu focalizare liniară și element piezoelectric din PVDF

pentru a at[illegible] deja o comportare la transmisie în bandă largă, similară palpatorului piezoceramic cu strat de adaptare din fig. 3-9. Motivul îl constituie din nou similitudinea impedanțelor acustice.

În principiu, materialele piezoelectrice la dispoziție se completează din punct de vedere al proprietăților fizice. Astfel există posibilitatea fabricării palpatoarelor speciale pentru probleme dificile de control și pentru condiții ambiante grele, profitând de caracteristicile materialelor. Pe lângă aspectele tehnice, un rol important îl joacă și punctele de vedere economice, nu numai pentru fabricant, ci și pentru utilizator.

50

3.1.4 Cuplarea palpatoarelor

În par. 2.3.3 s-a explicat de ce sunt utilizate în general fluidele pentru cuplarea palpatoarelor. Cauza constă în faptul că, spre deosebire de o fantă umplută cu lichid, un strat de aer cu grosimea de doar o fracțiune de mm este practic nepenetrabil. Dacă se așază palpatorul pe un material, se poate obține un contact suficient de intim între suprafețele piesei și palpatorului, obligatoriu pentru transmiterea sunetelor și care necesită o forță corespunzător de mare, doar dacă suprafața de contact a palpatorului, piesa de control sau ambele constau dintr-un material moale, astfel ca cele două suprafețe

să se muleze pe conturul palpatorului sub influența unei presiuni mecanice. Această situație este folosită în anumite aplicații, de ex. când materialul de control își modifică caracteristicile când este udat, pentru realizarea *cuplării uscate*. Pentru suprafețe netede se pot obține palpatoare speciale pentru cuplare uscată. Suprafețele unor astfel de palpatoare constau din folii subțiri, flexibile, din cauciuc (fig. 3-12 a). Cu acest palpator se poate aplica și tehnica prin reflexie și tehnica prin transmisie. Pentru transmisia prin lemn cu ajutorul cuplării uscate, s-au dovedit corespunzătoare semisfere din cauciuc sau silicon (cu transmisie sonică bună), lipite sau fixate (pentru a putea fi înlocuite) în fața palpatorului (fig. 3-12 b). Deoarece reflexia pe un strat de cuplare așa de subțire crește o dată cu frecvența, rezultă că sistemul de cuplare uscată, dacă este posibil, se poate executa doar la frecvențe sub 1 MHz. Chiar și în astfel de situații, cuplarea prin fluide este de preferat, din cauza transmisiei sonice principial mai bune.

Cea mai simplă soluție, folosirea apei, este bună la tehnica automată de control (vezi cap. 5), totuși nu este practicabilă la controlul manual. Din cauza vâscozității sale reduse, apa se scurge repede de pe suprafețe, micșorându-și rapid grosimea stratului și în plus cauzează coroziunea multor materiale. Aceste neajunsuri se pot preveni dacă apa se amestecă cu substanțe adecvate, de ex. clei de tapete, iar în plus se adaugă și agent anticorosiv.

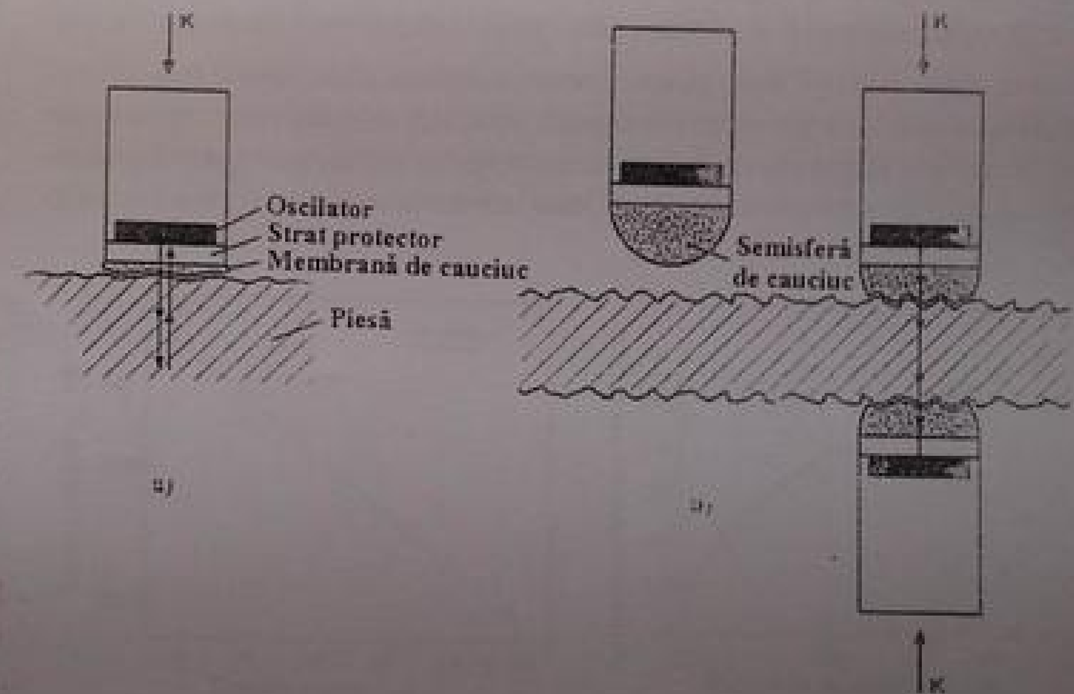


Fig. 3-12 Palpatoare pentru cuplare uscata
a) pentru tehnica prin reflexie
b) pentru tehnica prin transmisie
(K : forța de apăsare a suprafeței de contact)

Deoarece în multe locuri în care se realizează controale ultrasonice, stau la dispoziție, pentru alte scopuri, uleiuri de mașină și unsori consistente, și acestea sunt utilizate pentru cuplare. Dezavantajele legate de această utilizare, murdărirea pieselor și controlorului, au condus la folosirea din ce în ce mai mult a cuplanților speciali pe bază de apă cărora li se minimalizează efectul corosiv prin adăugarea inhibitorilor corespunzători. Vâscozitatea acestor cuplanți se alege astfel încât suprafețele să fie bine umectate, iar aderența să fie bună, chiar când se aplică pe suprafețe oblice sau chiar pe plafon. Astfel se realizează condiții uniforme de cuplare, chiar și pe perioade lungi de timp.

Medii de cuplare de acest tip pot fi folosite doar până la maxim 80°C. Dacă trebuie controlate piese mai fierbinți, se folosesc nu numai palpatoare speciale cu pene suplimentare și straturi protectoare stabile la temperatură, ci și cuplanți care prezintă, la temperaturile respective, același comportament cu agenții obișnuiți de cuplare folosiți la temperatura camerei. Astfel de cuplanți pot fi, în funcție de temperatura existentă la suprafața piesei, uleiuri vâscoase, unsori, săruri, paste de lipit sau amestecuri de sticlă, care se găsesc inițial sub formă de pulbere și care se topesc după contactul cu materialele fierbinți la temperaturi de 400°C sau mai mult, în funcție de consistență. Trebuie luate măsuri de siguranță în aplicații de acest fel, deoarece multe unsori sau uleiuri degajă substanțe periculoase la temperaturi înalte.

Pentru controlul obiectelor fierbinți, palpatoarele trebuie protejate sau trebuie construite într-un mod special. Îmbinările lipite în mod obișnuit nu rezistă la temperaturi înalte. În special modificările violente de temperatură sau distribuțiile neuniforme ale acesteia conduc rapid la dezlipiri, ca urmare a coeficienților de dilatare foarte diferiți ai materialelor folosite în palpatoare (de ex. piezoceramici și materiale plastice), dezlipiri care fac palpatoarele neutilizabile. Deasupra temperaturii de 80°C sunt deci necesare *palpatoare speciale pentru temperaturi înalte* [26].

Fig. 3-13a prezintă construcția principială a unui palpator cu linie de întârziere stabilă la temperatură pentru cuplare pe perioade scurte pe piese fierbinți. În vreme ce palpatorul propriu-zis este construit prin tehnica tradițională, linia de întârziere are sarcina de a realiza o transmitere optimă a sunetelor în piese, dar o transmisie redusă a căldurii spre palpatorul propriu-zis. Ea împiedică mai întâi o creștere bruscă de temperatură a palpatorului la contactul cu piesa fierbinte. Timpul de contact trebuie să fie totuși sub control, astfel ca să fie exclusă încălzirea întregului palpator. La o manevrare corectă, timpul este limitat la câteva secunde, apoi linia de întârziere este cufundată imediat în apă, pentru răcire, de abia după aceasta palpatorul se așază din nou pe piesă. În acest fel, creșterea temperaturii penei de întârziere se limitează la un strat subțire din apropierea suprafeței de contact (fig. 3 - 13 b). Astfel decalajele de timp, care se produc din cauza dependenței de temperatură a vitezei sonice în pană, sunt substanțial mai reduse decât în cazul unui timp mai lung de cuplare, care ar avea ca urmare o distribuire a temperaturii pe întreaga lungime a penei de întârziere. Fig 3-14 a și b clarifică aceste relații pentru

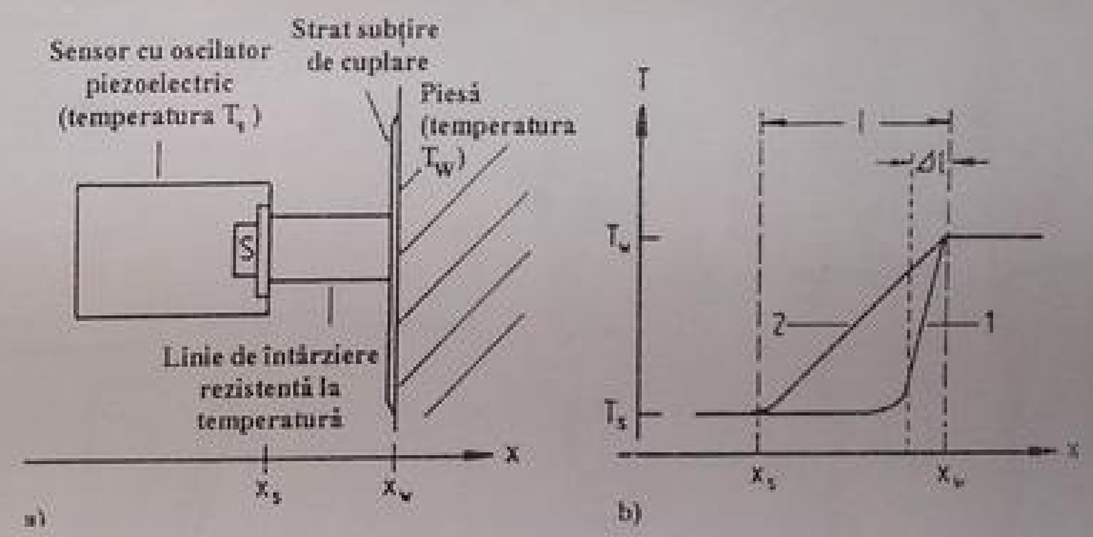


Fig. 3-13 a) Construcția de principiu a unui palpator pentru temperatură ridicată cu linie de întârziere
b) Distribuția temperaturii la cuplarea pe piese fierbinți (temperatura T ca funcție de distanța x în linia de întârziere).
Curba 1: cuplare pe timp scurt, curba 2: cuplare prelungită

o linie de întârziere din poliimid, un material plastic, inițial conceput pentru tehnica zborurilor cosmice, care este în mod constant rezistent la temperatură până la 500°C.

Des mai sunt folosite sticla, ceramica sau ceramica de sticlă. Viteza de propagare sonică este la aceste materiale mult mai puțin dependentă de temperatură. Din această cauză, abaterea datorită temperaturii la cuplarea pe piese firbinți este practic neglijabilă. Totuși, ca urmare a impedanțelor acustice mai mari, cuplarea este mult mai dificilă comparativ

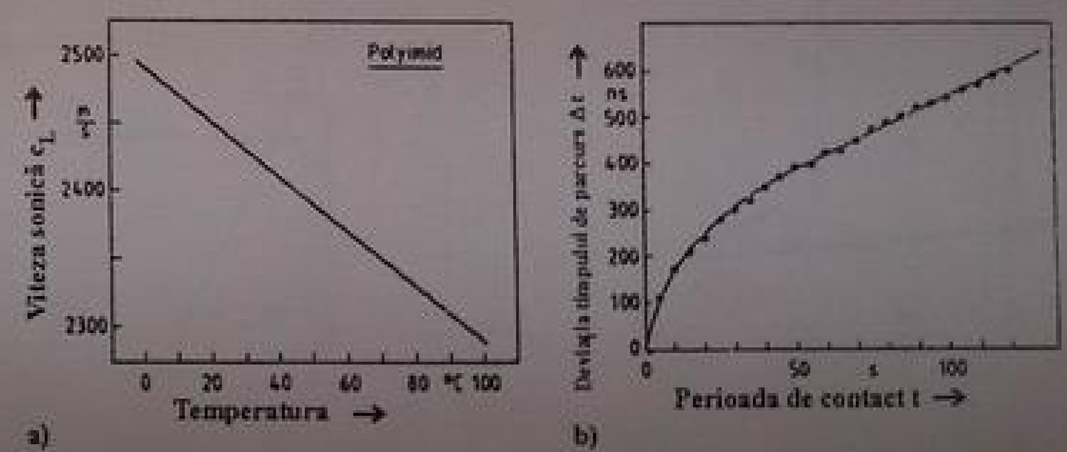


Fig. 3-14 a) Viteza sonică c_L (longitudinală) în poliamid în funcție de temperatura T
b) Deviația timpului de parcurs Dt ca urmare a încălzirii la diferite perioade de contact t. (temperatura piesei 123°C)

cu penele din poliimid, în special în cazul suprafețelor cu rugozitate mare. În plus, conductibilitatea lor termică este mai ridicată și în consecință timpul de contact cu piesa este mai scurt.

Fig. 3-15 prezintă două forme tipice de prezentare a palpatoarelor cu linie de întârziere din poliimid. Palpatoarele cu linie de întârziere stabilă la temperaturi ridicate sunt folosite în majoritate la măsurători de grosime în legătură cu aparate de măsurarea grosimilor de tip digital. Pentru perioade mai lungi de contact cu piese fierbinți se utilizează și construcții cu răcire suplimentară a penei de întârziere. Dacă palpatoarele trebuie folosite într-un mediu ambiant fierbinte, adică nu este posibilă răcirea lor, atunci este necesară utilizarea altor tehnici de lipire și de îmbinare decât cele obișnuite. O soluție în acest sens constă în introducerea în carcasa palpatorului, prin presare cu ajutorul unui arc, a piezoelementului, stratului de protecție și corpului de amortizare, împreună cu unsoarea rezistentă la temperatură sau amestecul de sticlă, dispus între elementele constituente. Din cauza stabilității la temperatură a niobatului de litiu, acesta este folosit ca oscilator la temperaturi peste 500°C. Pentru controlul automat al lingourilor fierbinți sunt preferate soluții speciale cu oscilatoare ultrasonice electrodinamice (vezi par. 2.1.4).

Fig. 3-15 Palpatoare cu linie de întârziere din poliimid

3.2 Aparate de control cu ultrasunete.

În fig. 3-16 este prezentată schema unui aparat de control cu ultrasunete. Un generator de impulsuri declanșează în emițător impulsuri electrice scurte în succesiune rapidă, care produc în palpator impulsuri sonice, a căror frecvență și lățime de bandă depind de caracteristicile acustice ale emițătorului. Impulsul acustic revenit din piesă (*ecou*) este transformat de același palpator în semnal electric și dirijat către amplificatorul de baleiaj vertical al unui tub catodic. Deplasarea pe orizontală a fasciculului de electroni formează baza de timp, ca în cazul unui oscilograf. Diferitele impulsuri sunt deci prezentate pe ecran în succesiune temporală ca deviere verticală față de *baza de timp*. Ecranul începe în partea stângă cu *impulsul de emisie* SI. În vreme ce fasciculul de electroni este deviat spre dreapta, cu viteză constantă, apar reflexii de la suprafața defectului ca *ecou de defect* FE și ca *ecou de fund* RE, la distanțe corespunzătoare între ele și față de impulsul de emisie. Această imagine se repetă cu fiecare impuls de emisie succesiv. Din cauza timpilor scurți de parcurs în piesă se poate lucra cu 100 până la 1000 impulsuri pe secundă, în funcție de vitezele sonice și de domeniul de control, astfel că ochiul observă pe ecran o imagine staționară, în care timpii de parcurs de pe baza de timp pot fi ordonați corespunzător cu localizarea în adâncime a defectelor. O astfel de prezentare a amplitudinii ecourilor în funcție de timpul de parcurs este denumită *prezentare A*.

Numărul impulsurilor de emisie generate într-o secundă poartă numele de *frecvență de repetiție a impulsurilor*. Ea este stabilită de fabricant la aparatele uzuale și se modifică o dată cu schimbarea domeniului de lucru. Cu cât se succed mai repede impulsurile, cu atât mai luminoasă apare indicația pe ecran și cu atât mai repede poate fi adusă piesa, în cadrul unui control automat tip puls cu puls, la următoarea poziție de control. Cu toate acestea, frecvența de repetare a impulsurilor este limitată superior: distanța dintre două impulsuri succesive trebuie să fie așa de mare, încât reflexiile provocate de impulsul anterior să se stingă complet. Dacă nu se întâmplă așa, atunci în cazul materialelor bune transmițătoare de sunet și la valori mari ale amplificării pot apare așa numitele "ecouri fantomă", care se pot confunda cu indicații de defecte (fig. 3-17).

Pentru explicitarea rezultatelor controlului, impulsurile electrice provenite de la palpator sunt prelucrate în cele mai diferite moduri. Pe lângă redarea naturală, așa-numita *prezentare HF* (înaltă frecvență), impulsurile pot fi redresate și filtrate, iar defectele mici, neinteresante, pot fi înlăturate printr-un prag (fig. 3-18). Se deosebesc *pragul linear*, când sub valoarea pragului nu mai sunt indicate ecouri, și *pragul nelinear*, când baza de timp este coborâtă pe partea vizibilă a ecranului cu valoarea pragului. Unele aparate permit și o prezentare a impulsurilor cu faza modificată (fig. 3-19).

Deviațiile orizontală și verticală trebuie să fie proporționale cu timpul de parcurs și cu amplitudinea impulsului de ecou. Această *liniaritate* necesară se poate verifica ușor: ecourile multiple de la o piesă fără defecte trebuie să fie situate la distanțe egale între

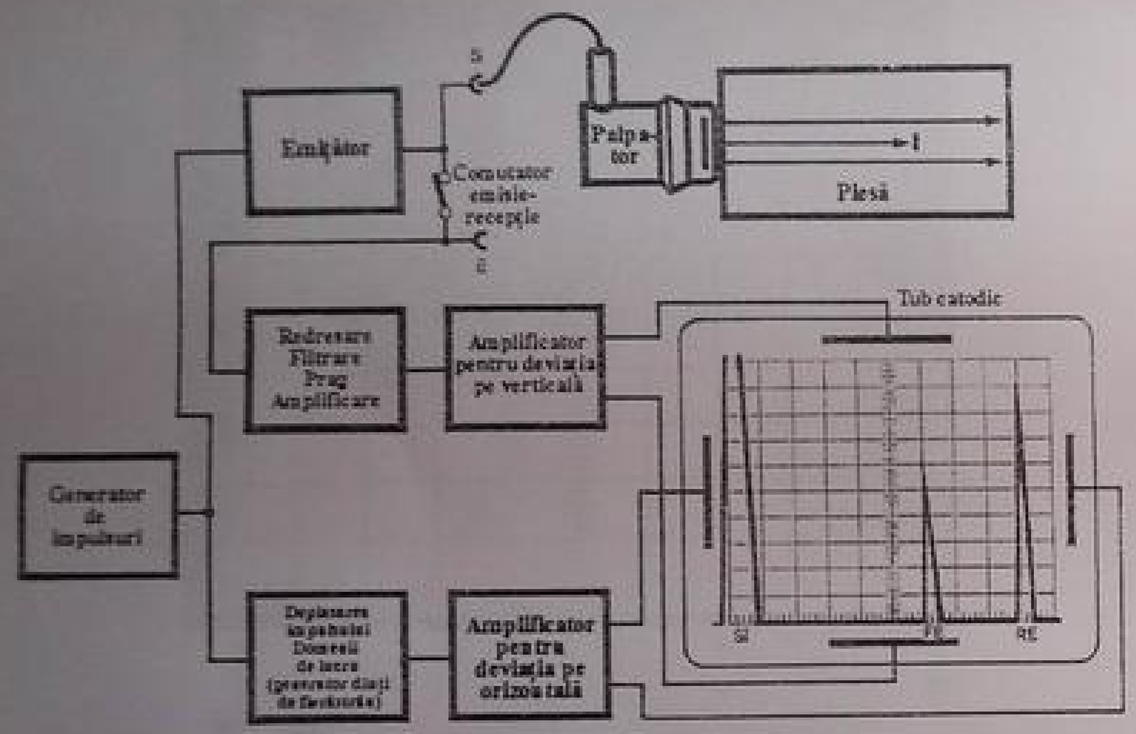


Fig. 3-16 Construcţia de principiu a aparatelor de control cu ultrasunete

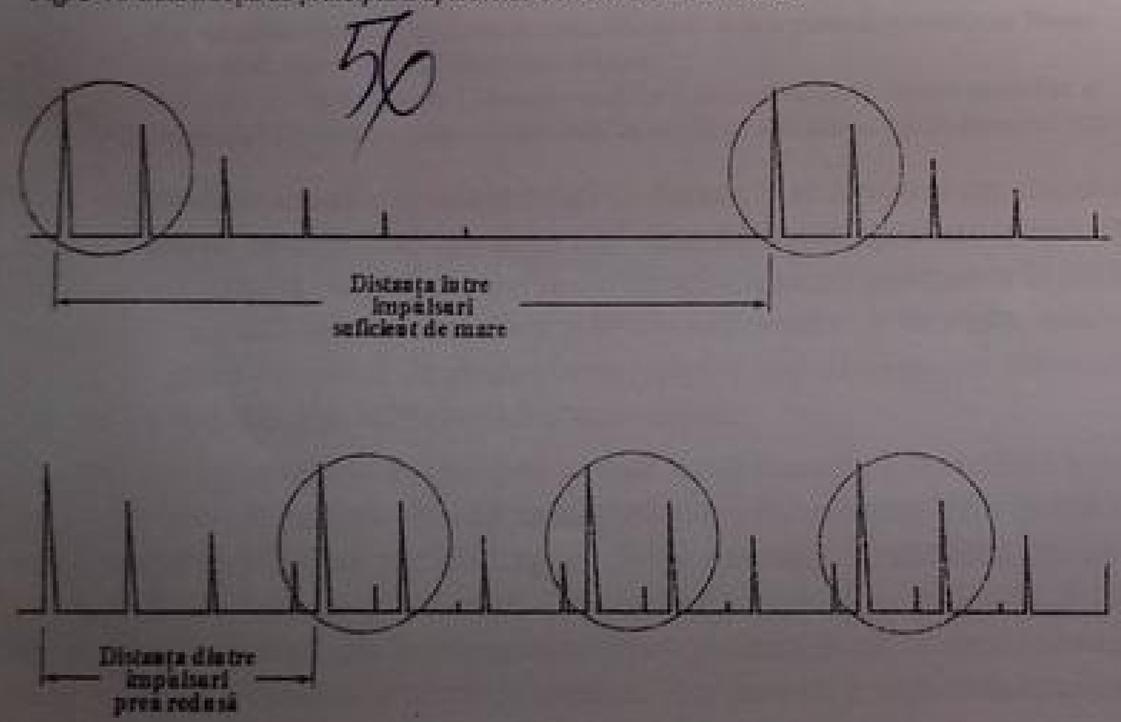


Fig. 3-17 Apariţia ecourilor fantomă în cazul unei serii prea rapide de impulsuri (jos)

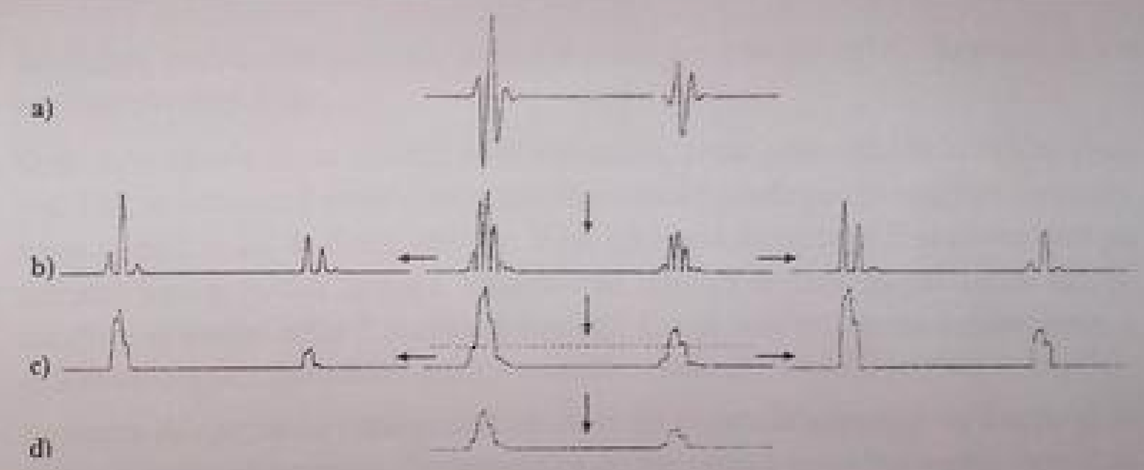


Fig. 3-18 a) Semnale neredresate sau semnale HF (înaltă frecvenţă)
b) Semnale redresate: stânga: redresare monoalternanţă pozitivă, mijloc: redresare bialternanţă, dreapta: redresare monoalternanţă negativă
c) Semnale filtrate, valoarea pragului: linie întreruptă; stânga: prag neliniar, dreapta: prag liniar
d) Amplificare redusă cu 6 dB.

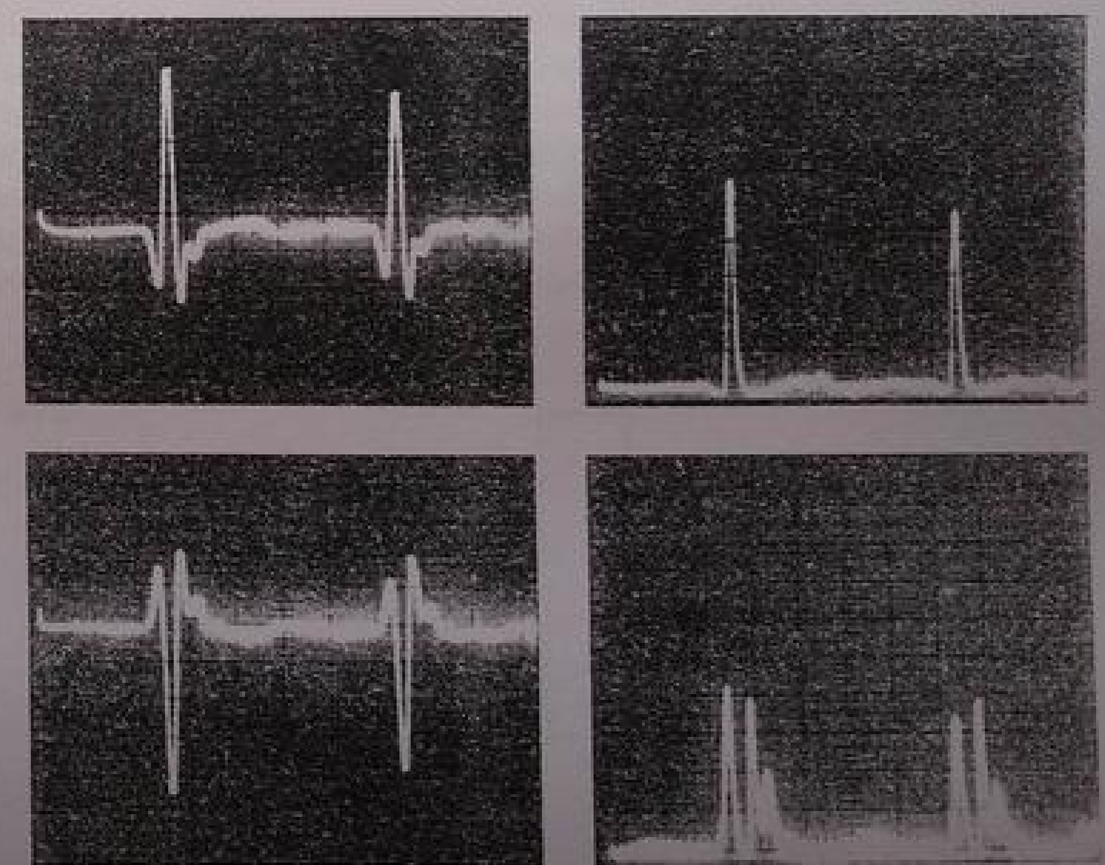


Fig. 3-19 Reprezentarea impulsurilor în cazul aparatelor de control cu ultrasunete: stânga: prezentare HF, dreapta: redresată
rândul de sus: prezentare normală
rândul de jos: defazaj de 180°

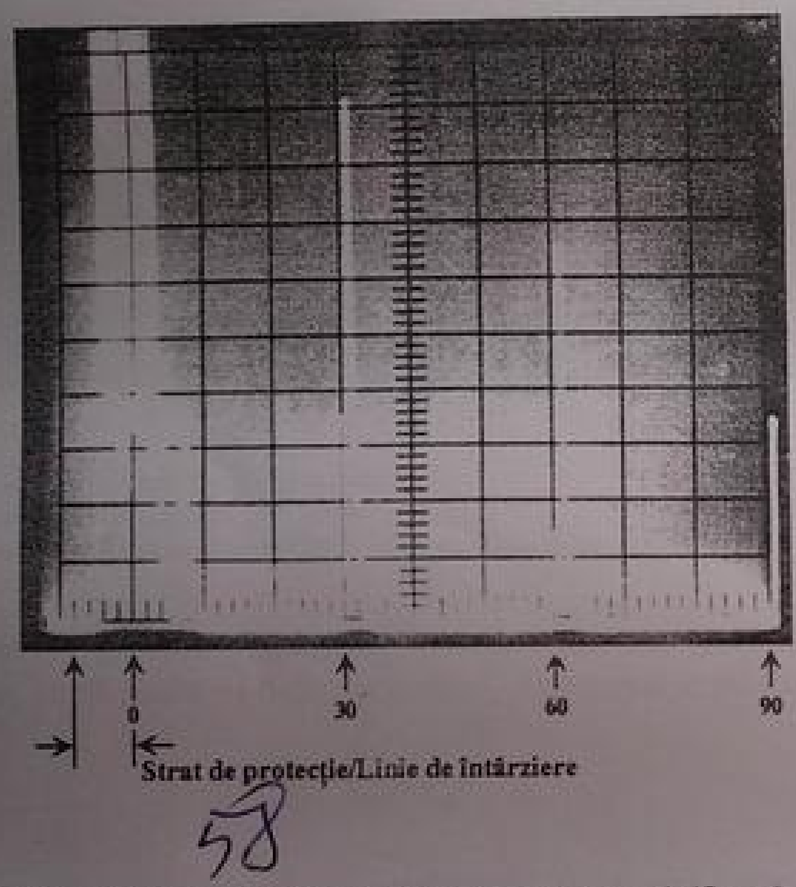


Fig. 3-20 Influența stratului de protecție sau a liniei de întârziere: pentru clarificare, impulsurile au fost deplasate spre dreapta. Serie de ecouri de fund de la o piesă cu grosimea de 30mm; domeniu de lucru 100 mm. Deplasare: 10 mm.
Suprafața piesei: diviziunea 1 (marcaj zero). La o calibrare corectă, flancul ascendent al impulsului de emisie se așază cu o jumătate de diviziune spre stânga față de domeniul vizibil.

ele. La o măsurare exactă se constată totuși că distanța între începutul impulsului de emisie și primul ecou de fund este puțin mai mare decât distanța dintre oricare alte două ecouri succesive. Acest fapt provine din timpul de parcurs suplimentar în stratul de protecție, respectiv în linia de întârziere și dintr-o mică decalare în timp între impulsul electric de emisie și impulsul de emisie acustică, care reprezintă momentul pătrunderii fasciculului în piesă. Fig. 3-20 clarifică această situație.

Înălțimea ecourilor se modifică cu ajutorul unui *buton de amplificare* calibrat în dB. Pentru dublarea , respectiv înjumătățirea înălțimii unui ecou este necesară o variație de +6dB, respectiv -6dB (vezi par. 2.3.1, relația (2-9)). Afirmația este adevărată doar când nu este acționată comanda de supresare a impulsurilor mici printr-un prag (fig. 3-18). În situația unei viteze sonice de propagare constante și corect fixate, deviația orizontală poate fi calibrată direct în grosimi de material. Prin aceasta, poziția defectului este deosebit de ușor de determinat. Aparatele ultrasonice sunt de cele mai multe ori etalonate în mm oțel și prezintă domenii de control între 5 mm și 10 m. Au posibilitatea

de reglare pentru viteza sonică, pentru a putea prezenta pe ecran distanțele în alte materiale în mod fidel.

Dacă este nevoie să se lucreze prin transmisie și nu prin metoda reflexiei (vezi par. 3.3), se acționează asupra comutatorului dintre bornele pentru emițător, respectiv receptor (S/E în loc de S+E), vezi fig. 3-16. La borna de recepție E se conectează un palpator separat pentru recepție. Situația este identică în cazul palpatoarelor SE, cu urmare a existenței celor 2 oscilatori separați. Cauza unei presupuse nefuncționări a aparatelor o reprezintă adesea poziția eronată a *comutatorului* SE (emisie - recepție).

Aparatele de control cu ultrasunete trebuie să fie reglate în domeniul de frecvență în care se efectuează controlul. Caracteristica de frecvență a amplificatorului trebuie să fie alcătuită astfel încât să acopere un domeniu mai amplu decât cel stabilit de frecvența medie și lățimea benzii palpatorului folosit. De aceea, la aparatele de control cu ultrasunete se dau pentru caracteristica de frecvență a amplificatoarelor de regulă frecvențele limită la -3dB, în interiorul lor deviațiile caracteristicii de frecvență fiind mai mici de 3dB. Pe de altă parte, spectrul de frecvență al impulsului de emisie trebuie să conțină frecvențele care trebuie stimulate în palpator. Sunt răspândite așa-numitele *emițătoare de impuls*, care generează la ieșire un impuls de tensiune electrică cu o durată de creștere foarte scurtă și cu o scădere exponențială ceva mai lentă (fig. 3-21). Timpii tipici de înjumătățire $\Delta t_{50\%}$, necesari scăderii la 50% a tensiunii, au valori între 30 și 100 nsec. (fig. 3-22). Într-o aproximație grosieră, un astfel de emițător de impulsuri poate excita palpatoare cu frecvențe până la valoarea maximă de $f_0=1/\Delta t_{50\%}$. În spectrul de frecvență al impulsului de emisie, la frecvența f_0 valoarea este scăzută la 10% din amplitudinea maximă. Se utilizează și *emițătoare dreptunghiulare* cu lățime variabilă

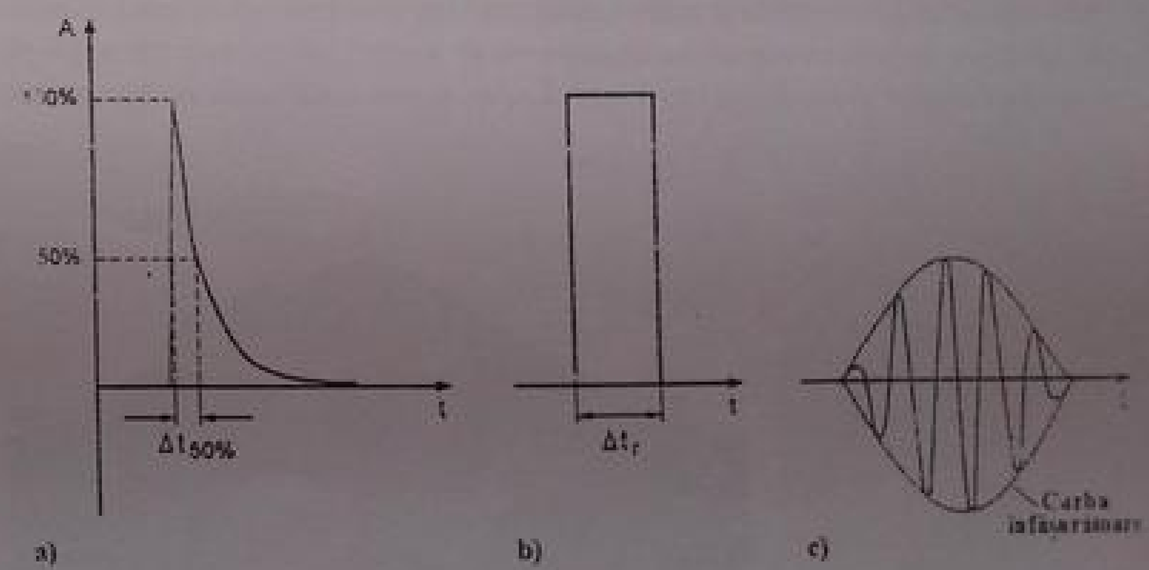


Fig. 3-21 Impulsuri de emisie ale aparatelor ultrasonice
a) emițător de impulsuri
b) emițător dreptunghiular
c) emițător CS (semnale controlate)

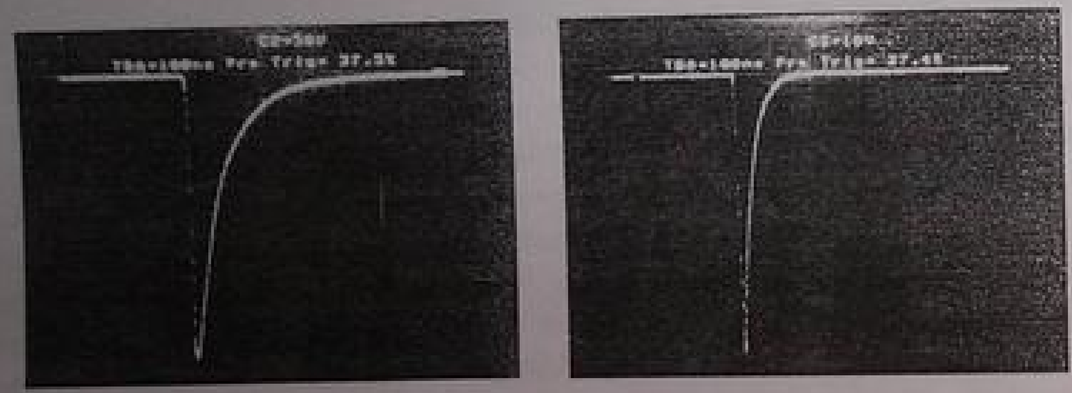


Fig. 3-22 Emițător de impulsuri cu lărgimi diferite
a) emițător de putere, $\Delta t_{s/2} < 60$ ns
b) emițător de înaltă frecvență (HF) pentru rezoluție înaltă, $\Delta t_{s/2} < 30$ ns

a dreptunghiului (fig. 3-21 b). Lățimea Δt_k este astfel fixată încât oscilația palpatorului să fie excitată pe cât posibil pe frecvența medie f_m. Fenomenul se produce în cazul în care

60

$$\Delta t_k = \frac{1}{2 \cdot f_m} \qquad (3\text{-}5)$$

Așa-zisele *emițătoare CS* (cu semne controlate) [27,28,29]produc drept semnale de excitare trenuri de unde sinusoidale, cu frecvența, durata și curba înfășurătoare reglabile (fig. 3-21c). Și ele se pot optimiza pentru cazul palpatorului folosit.

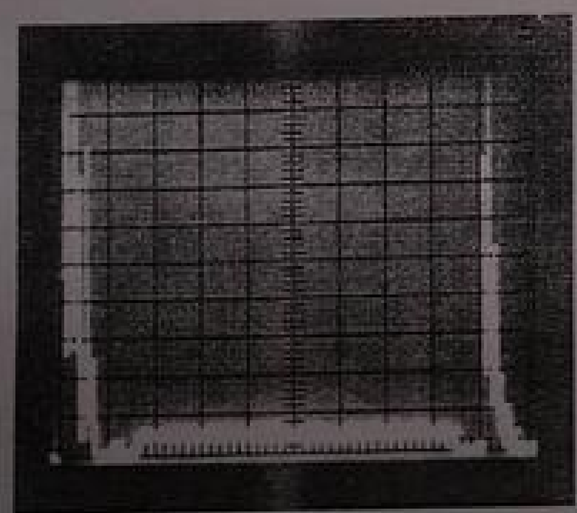


Fig. 3-23 Alegerea domeniului de lucru prin diafragma monitorului

Pentru ușurarea recunoașterii și evaluării defectelor, aparatele de control cu ultrasunete dispun de regulă de unul sau mai multe *monitoare*. Acestea sunt circuite electronice suplimentare ale aparatului, care acționează doar asupra unei porțiuni din imaginea A, porțiune aleasă mai înainte printr-o *diafragmă*. Domeniile de măsură sunt marcate prin diafragme, de exemplu prin faptul că acolo baza de timp a tubului catodic este vizibil ridicată (fig. 3-23). Toate ecourile care apar în interiorul diafragmei sunt supuse în aparat unei evaluări automate. De obicei interesează doar dacă amplitudinea ecoului depășește sau se află sub un prag de semnal, care poate fi reglat (*pragul monitorului*). În această situație, se declanșează în aparat un semnal acustic, se conectează o lampă de avertizare și/sau se produce un semnal de comutare la borna de ieșire a aparatului. Prin acest semnal pot fi declanșate alte semnale externe, acustice sau optice. Dacă operatorul nu este în situația de a urmări permanent ecranul, de ex. în cazul controalelor executate pe piese complicate sau la cele executate pe platforme marine, el poate fi făcut atent prin cască sau printr-o diodă luminoasă aplicată pe palpator (fig. 3-24) de existența indicațiilor în domeniul de apariție a defectelor, în care se așteaptă să fie detectate defecte. De cele mai multe ori, astfel de monitoare sunt supuse și unei *deparazitări statistice*. Pentru a împiedica interpretări eronate din cauza unor depășiri întâmplătoare ale pragului monitorului, de ex. declanșări ca urmare a perturbațiilor electrice induse, pe monitor este indicat un defect doar când au fost depășite cel puțin n semnale de prag reglate direct unul după altul. Numărul n este de obicei reglabil între valorile 1 și 500 și poartă numele de *rată de deparazitare*.

Monitoarele pot funcționa însă și în alt mod: amplitudinile și timpii de parcurs corespunzătoare ecourilor din interiorul diafragmei sunt stabilite și transmise la borna de ieșire a aparatului sub forma unor semnale electrice analoge sau digitale. Semnalele de ieșire ale monitorului trebuie să corespundă exact amplitudinilor ecourilor. Se vorbește despre *linearitatea monitorului*. În raport cu funcția sau cu mărimea afișată la

Fig. 3-24 Palpator cu diodă luminoasă pentru semnalizarea defectului

ieșire, monitoarele sunt denumite și *monitoare de semnal* (decizia, respectiv ieșirea da/nu), *monitoare proporționale* (tensiunea de ieșire proporțională cu înălțimea ecoului), *monitoare de timp de parcurs* (tensiunea de ieșire proporțională cu timpul de parcurs al ecoului) sau *monitoare de integrare* (tensiunea de ieșire proporțională cu aria de sub ecou sau ecouri). Monitoarele fac posibil controlul ultrasonic automat (vezi cap 5). Cu ajutorul lor rezultatele controlului pot fi prezentate și în alt mod decât cel studiat până acum, prezentarea A. Mai multe imagini A sunt colectate și folosite pentru a forma prezentările B sau C. Fiecare imagine A singulară formează aici un rând al unei reprezentări plane, iar fiecare ecou al imaginii A reprezintă un punct. Dacă sunt urmărite doar ecourile care depășesc un prag stabilit, se obține o prezentare binară, alb-negru, adică da-nu. Din contră, dacă înălțimile ecourilor sunt desenate în tonuri de gri sau culori diferite, proporțional cu înălțimea lor, rezultă imagini B sau C analoge sau evaluate.O imagine B rezultă dintr-o secțiune prin piesă în lungul unei linii L pe care este deplasat palpatorul. Între însumările de formă lineară ale punctelor reprezentând impulsurile de emisie și ecourile de fund, devin vizibile reflexiile din interiorul materialului (fig. 3-25).

62

În cazul prezentării C, este vorba de o vedere de sus a obiectului controlat, pe care sunt proiectate în planul piesei doar reflexiile de la defecte (fig. 3-26).

Dacă în locul amplitudinii ecoului se folosește timpul de parcurs al ecoului pentru comanda luminozității sau culorii punctelor imaginii, se vorbește despre o prezentare în *imagine D*. Ca un alt ajutor pentru evaluare, anumite aparate ultrasonice dispun de un *egalizator de adâncime* electronic. Spre deosebire de amplificarea constantă pe întreg domeniul afișat, în cazul egalizatorului de adâncime amplificarea se poate regla în funcție de poziția în adâncime. Reglarea se poate realiza continuu sau în trepte, în raport cu sistemul de construcție al aparatului. Folosind egalizatorul de adâncime, toate ecourile provenind dintr-o serie descrescândă pot fi afișate pe ecran cu aceeași înălțime (fig. 3-27).

Pentru toate caracteristicile aparatelor, inclusiv palpatoarele utilizate, norma DIN 25450 stabilește prescripții de execuție cu toleranțe strânse. Prescripții similare sunt în pregătire ca norme europene. În plus există astăzi nenumărate norme naționale specifice (de ex. BS 4331 sau ESI 98-9).

Fig. 3-28 arată un aparat portabil de control în mărime obișnuită, uzual în perioada actuală. Astfel de aparate au dimensiuni reduse, greutate mică, funcționează cu baterii timp de minimum 8 ore neîntrerupt și sunt apte de a fi folosite în condiții dure, datorită carcasei lor robuste.

Alături de aparatele analoge, și tehnica aparatelor ultrasonice este impresionată în zilele noastre de aparatele digitale, similar tendinței de dezvoltare a osciloscoapelor. Fig. 3-29 prezintă două aparate digitale obișnuite de control ultrasonic de mărimi diferite. Aparate de acest fel sunt proiectate de asemenea pentru întrebuințare mobilă, de aceea sunt prevăzute să funcționeze cu baterii și au o carcasă care le protejează contra

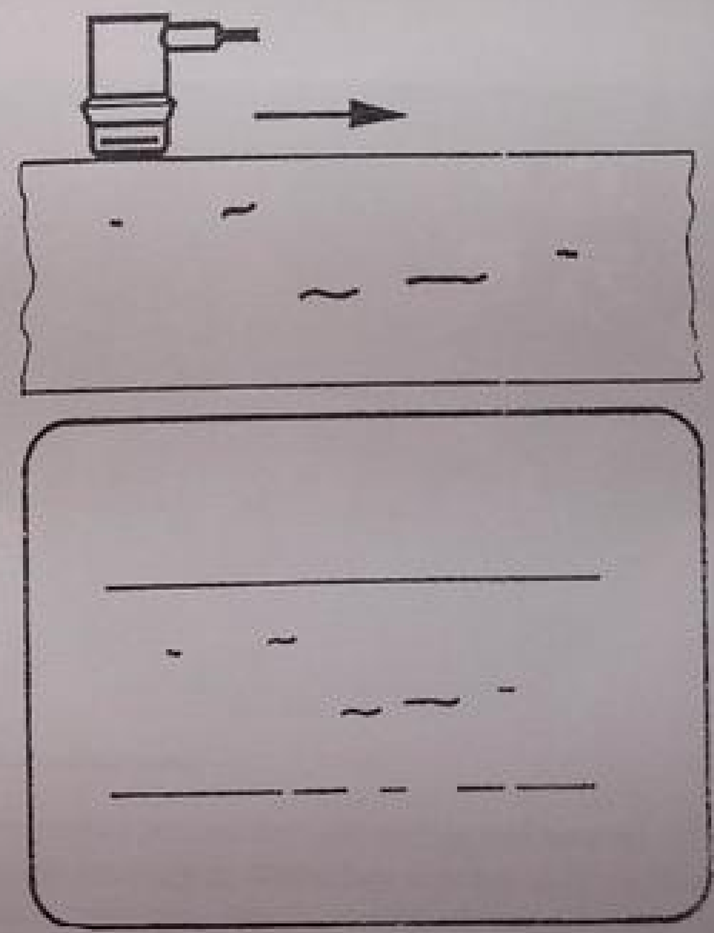
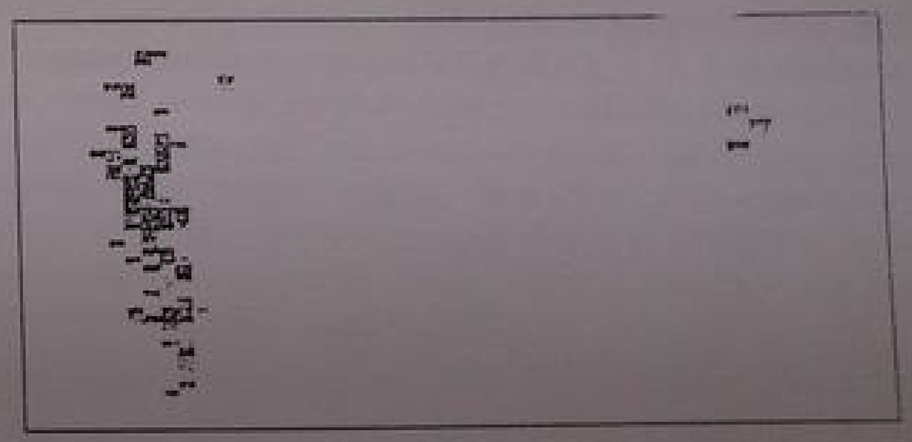


Fig. 3-25 Metoda cu prezentare B; palpatorul este deplasat în lungul unei linii (săgeata) [illegible] de defect prin dirijarea luminozității (după [6])



Client	:	XY-STAHL	Standoff	:	10/4M-54DB
Contract	:	5130780	Scan Type	:	Amplitude
Operator	:	NEU	Velocity	:	5930m/s
Area	:	470X340	Block Size	:	4
Item	:	221824K	Date	:	91-03-20

Fig. 3-26 Prezentarea C a unui defect intern într-o tablă (secțiune)

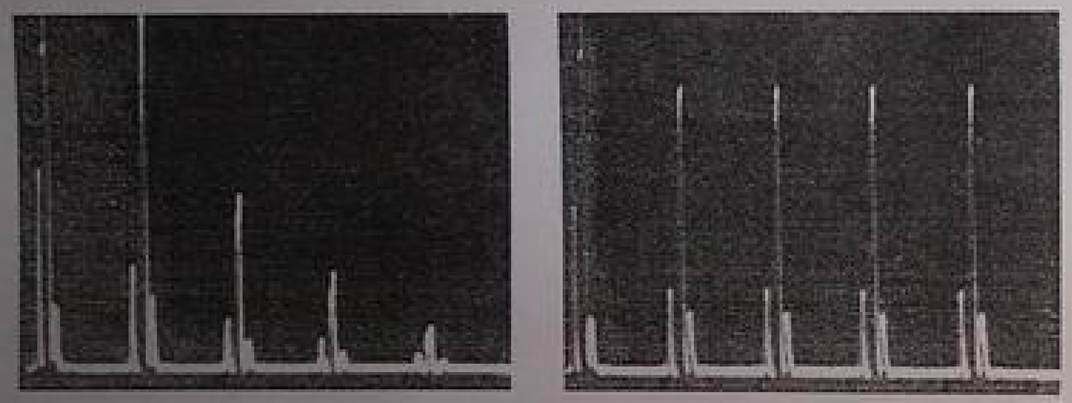


Fig. 3-27 Serie de ecouri pe ecran fără (stânga) și cu egalizator de adâncime (dreapta)

picăturilor de apă. Pe lângă prezentarea obișnuită a imaginii cu ecouri, controlorului îi sunt afișate pe ecran în text clar informații despre amplitudinea, adâncimea și poziția ecoului de defect aflat în zona diafragmei. Suplimentar poate fi calculată de către microprocesorul aparatului și afișată pe ecran mărimea echivalentă a reflectorului conform *metodei AVG* (vezi par. 3.4.3). Pot fi luate automat în considerație de către aparatele digitale și caracteristicile fizice ale materialului, ca de ex. viteza sonică de propagare și absorbția ultrasonică.

64

Întrebuințarea aparatelor digitale se bazează pe puține elemente de claviatură, întreaga diversitate de posibilități de reglare se face cunoscută printr-un meniu pe ecran. Deosebit de prietenos cu utilizatorul este meniul Scroll-Down, la care toate funcțiunile aparatului sunt descrise în text clar. Acestea pot fi alese cu ajutorul șirurilor luminoase (fig. 3-30 a), care, în cazul aparatelor prezentate în fig. 3-29, pot fi deplasate manual, prin mișcarea rotiței de pe panoul frontal. Aparatele digitale posedă în plus posibilități de stocare a valorilor măsurate, a conținutului ecranului (imagini A) și a mai multor serii de parametri (fig. 3-30 b). Este vorba de reglajele complete ale aparatului, care sunt memorizate printr-o apăsare de buton sau care pot fi apelate la orice moment ulterior de timp. În afară de aceasta, este posibilă "înghețarea" imaginilor momentane ale seriilor de ecouri de pe ecran, care pot fi studiate apoi în voie de către controlor.

Emițătorul și amplificatorul de recepție ale aparatelor digitale corespund celor ale aparatelor analoge. Domeniul lor de frecvență se întinde în etapa actuală până la 40MHz. Spre deosebire însă de aparatele analoge, distribuția ecoului după amplificatorul principal este digitalizată (fig. 3-31), prin faptul că la distanțe în timp dinainte stabilite Δt_A, numiți *pași de explorare*, este determinată amplitudinea momentană (explorată) și păstrată constantă până la următorul pas de explorare [30]. Valoarea inversă $1/\Delta t_A$ are dimensiunea frecvenței și este denumită *rată de explorare* sau *frecvență de digitalizare*.

Amplitudinea momentană este indicată printr-o mulțime de unități foarte mici, numite cuante. Cu cât sunt mai mici cuantele, cu atât mai ridicată este rezoluția. Dacă exploararea amplitudinii se realizează de ex. cu un convertor AD (Analog - Digital) de 8 biți, atunci domeniul observat al amplitudinii este împărțit în 2^8=256 cuante egale.

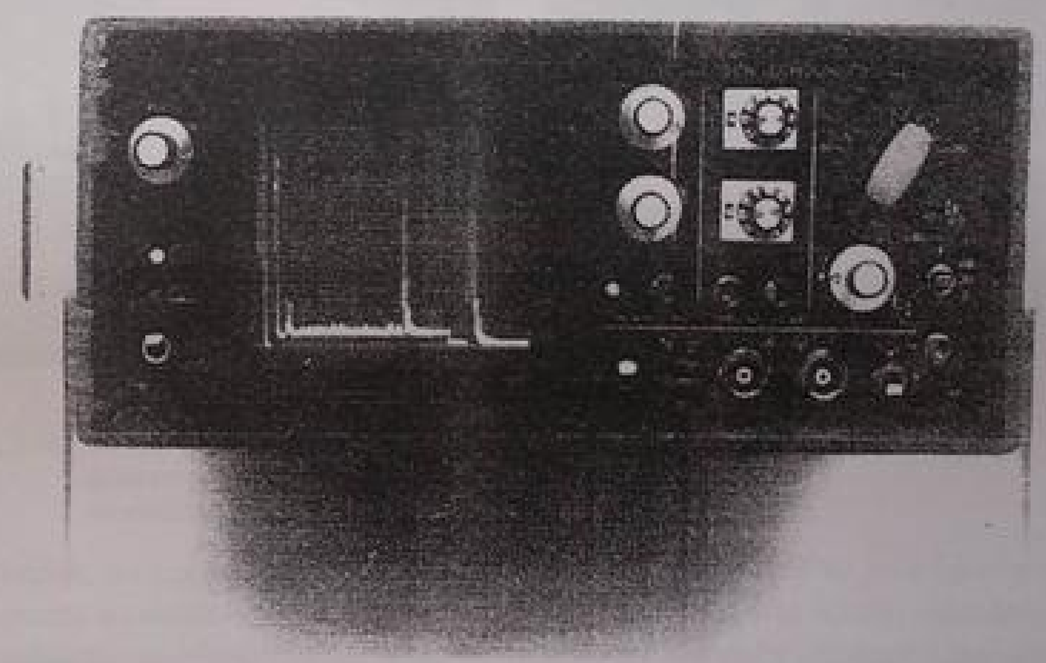


Fig. 3-28 Aparat ultrasonic analog

Pentru o redare fidelă a unei oscilații sinusoidale sunt necesari 10 pași de explorare. Din această cauză, frecvența de digitalizare ar trebui să fie de 10 ori mai înaltă decât limita superioară a frecvenței amplificatorului. Pentru reducerea cheltuielilor legate de conexiuni, unei explorări așa de dense îi sunt necesare de obicei mai multe cicluri de impulsuri succesive. Într-o astfel de situație, rata de explorare este denumită *rată echivalentă de explorare*.

Prin faptul că valorile digitale sunt formate punct cu punct pe ecranul sub formă de caroiaj al aparatului, se obține o imagine A digitală (fig. 3-32). Rezoluția ecranului este cu atât mai ridicată cu cât acesta poate să prezinte mai multe puncte (*pixeli*). Tuburile monitoarelor cu 512x320 pixeli sunt de rezoluție ridicată (fig. 3-29 sus). La acestea se creează impresia unei imagini analoge, deoarece pixelii singulari nu se mai pot recunoaște cu ochiul liber. O rezoluție scăzută (de ex. 320 x 256 pixeli, fig. 3-29 jos), dar și un consum mai redus de curent electric, se întâlnește la indicațiile *electroluminescente* și la cele cu *cristale lichide*.

În vorbirea curentă, ele sunt prescurtate prin ELD (Electroluminescent Display) și LCD (Liquid Crystal Display) și permit, datorită formei lor plane, utilizarea unor carcase pentru aparat de dimensiuni mici. Deoarece LCD-urile nu posedă propria sursă de lumină, ci doar modulează lumina incidentă sau transmisă, aceste ecrane nu pot fi citite în întuneric, cât timp nu sunt prevăzute cu o iluminare de fond suplimentară. Aceasta necesită un consum mare de curent, încât durata de funcționare a bateriilor este evident scăzută. Chiar și la lumina zilei sau la o iluminare artificială, LCD-urile pot

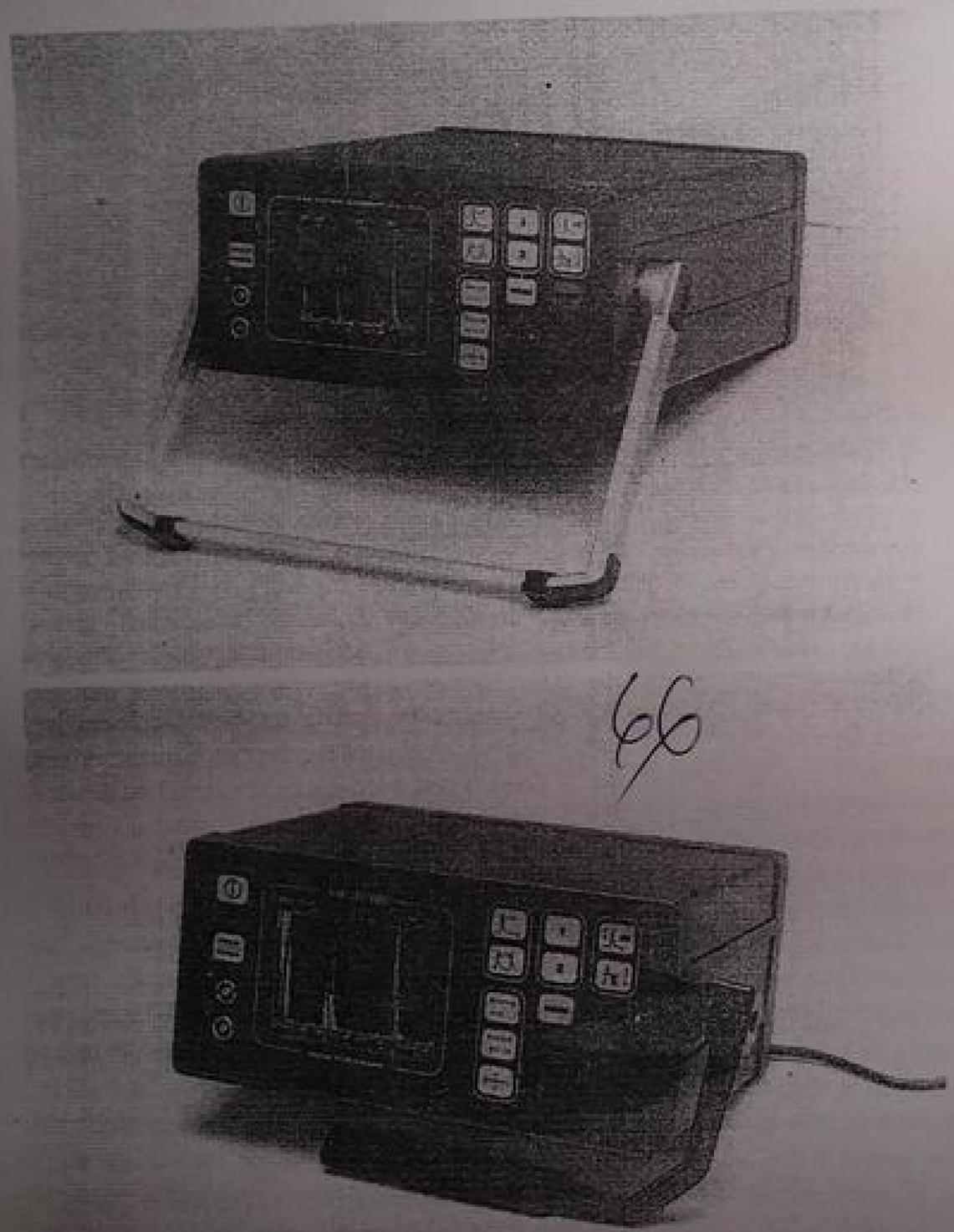


Fig. 3-29 Aparate ultrasonice digitale cu dimensiuni constructive diferite

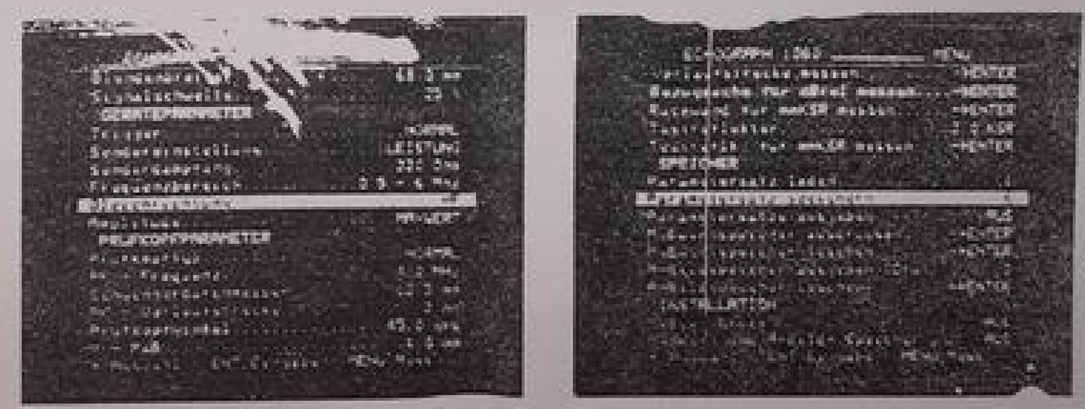


Fig. 3-30 Ecranul aparatelor digitale;
a) alegerea parametrilor de calibrare
b) selectarea posibilității de memorizare prin rând luminos

fi ilizibile, în cazul direcțiilor oblice de observare. ELD^unk nu prezintă acest dezavantaj, deoarece punctele singulare ale imaginilor luminează ele însele, asemănător monitoarelor de televiziune sau tuburilor catodice ale aparatelor ultrasonice analogice. În ambianță luminoasă, în special în cazul lucrului în lumină solară directă, este posibil ca pentru ultimele trei tipuri de ecrane menționate să fie necesară protejarea lor prin parasolare detasabile.

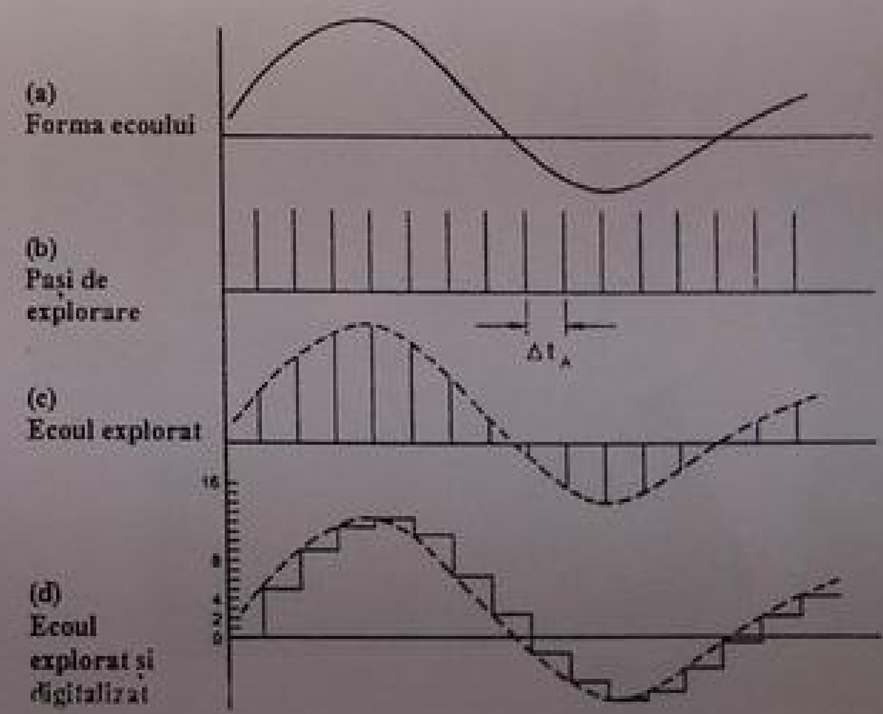


Fig. 3-31 Principiul digitalizării

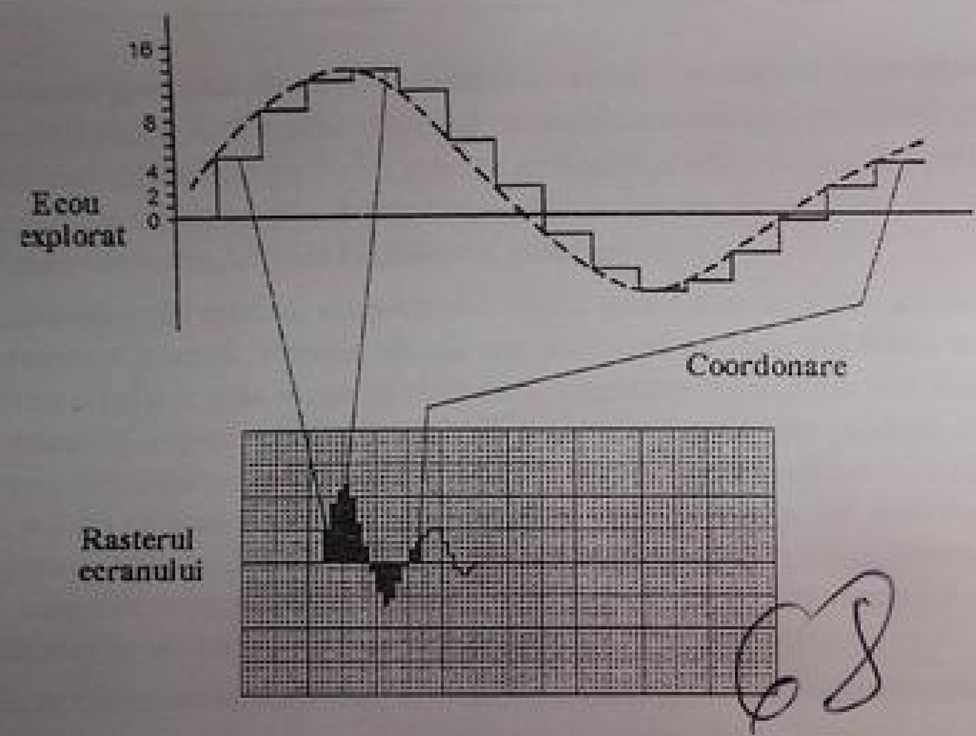


Fig. 3-32 Prezentare prin puncte (pixeli) a ecoului digitalizat pe rasterul ecranului

Aparatele ultrasonice trebuie să prezinte pe ecran semnale *tranziente* - acestea sunt semnale prezente doar o anumită perioadă de timp, de ex. un ecou care apare un timp scurt pe ecran în urma trecerii rapide a palpatorului peste un defect, ecou cu durata de doar 100 nanosecunde - chiar la examinarea unor dimensiuni mari, ca de ex. 1m de oțel, corespunzând unui timp de parcurs de 0,3 milisecunde. În această situație trebuie prelucrate repede multe valori singulare obținute din palpare. Sunt deci necesare anumite cheltuieli privind prelucrarea semnalelor, reducerea datelor ca și nivelarea și prepararea semnalelor. De aceea *frecvența de regenerare a imaginii* - aceasta reprezintă frecvența cu care sunt prezentate pe ecran noile imagini A - este substanțial mai redusă decât frecvența de repetare a impulsurilor de emisie. Doar la aparatele analoge veritabile cele două frecvențe sunt identice. Valori între 40 și 60 Hz pentru frecvența de regenerare a imaginii la aparatele digitale este total satisfăcătoare pentru probleme de control manual, nu însă și pentru controalele automate rapide. Avantajul hotărâtor al aparatelor digitale constă în faptul că ecourile prezente, conținutul ecranelor sau valorile măsurate în formă digitală pot fi înregistrate direct pe o imprimantă sau pot fi supuse unei prelucrări ulterioare de semnal într-un calculator. Pentru aceasta aparatele posedă cel puțin o fișă normată, de regulă serială (RS232C) care este adesea realizată bidirecțional. În acest caz aparatele pot fi comandate direct de la calculator.

Aparatele ultrasonice digitale oferă de asemenea posibilitatea măsurătorilor de timp. Adesea trebuie determinați timpii de parcurs între ecouri succesive, din care se poate calcula și indica fie grosimea materialului, fie invers viteza de propagare când este

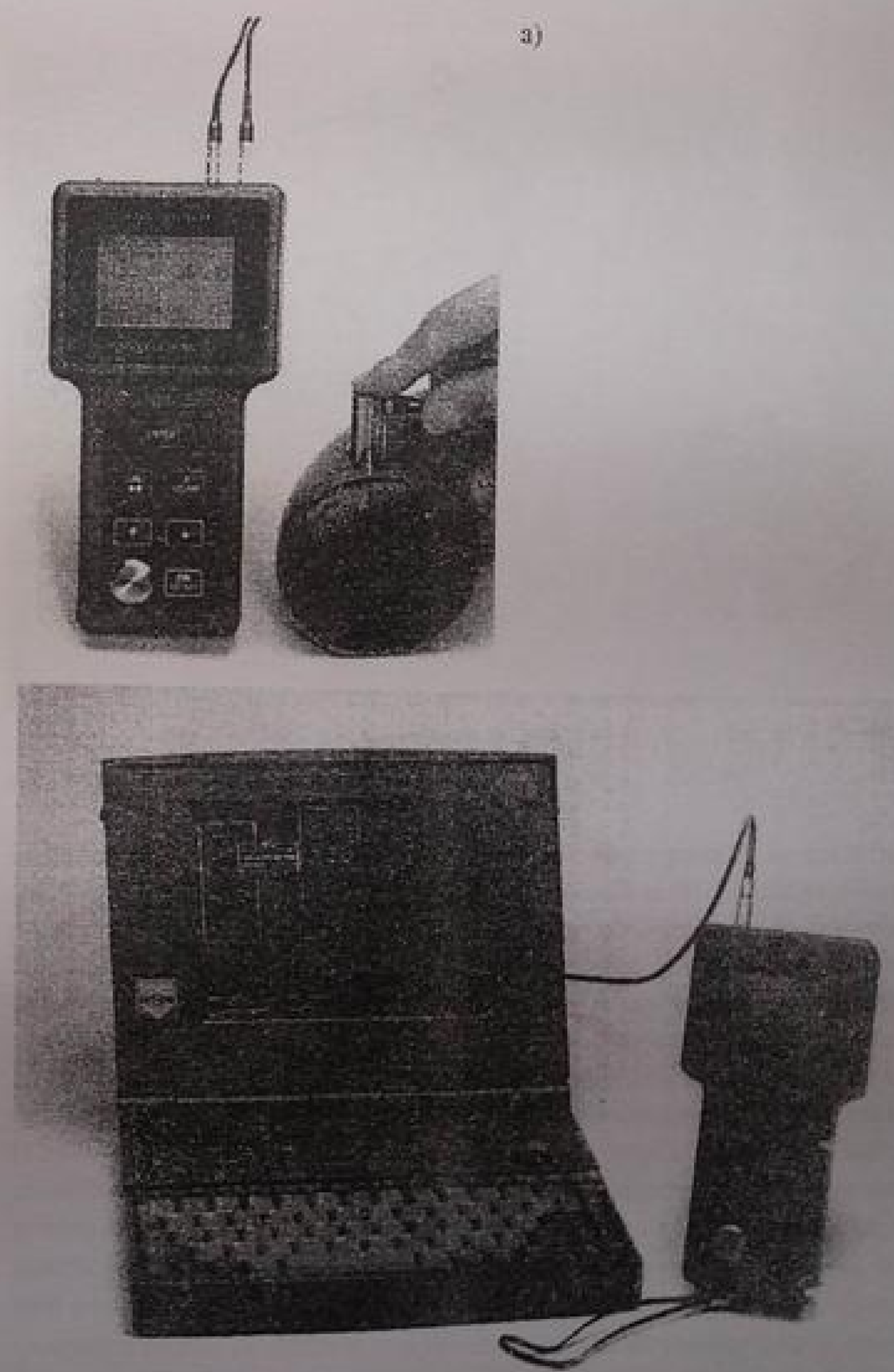


Fig. 3-33 Aparate digitale de măsurare a grosimii cu indicație tip imagine A
a) preluarea valorii măsurate
b) transmiterea datelor

cunoscută grosimea. Deseori interesează în cadrul controlului materialelor doar grosimea piesei. Acesta este cazul când trebuie să se stabilească pe o piesă corodată, dacă materialul rămas are încă o grosime suficientă pentru a rezista fără pericol la o funcționare ulterioară (fig. 3-33). Este vorba de trasee de conducte din industria chimică sau de magistralele din industria petrolieră.

Pentru controlul manual, aparatele ultrasonice sunt dotate deci doar cu funcția de măsurare a grosimii. Valoarea căutată este prezentată pe ecran sub formă numerică. Forma ecoului în zona în care se efectuează măsurătoarea este prezentată doar pentru verificare. Ca tip de palpator este folosit de obicei cel cu emisie - recepție, din cauza puterii bune de separare la apropiere și a rezistenței la frecare (vezi par. 3.1). Domeniul de măsură cu acest tip de palpator este situat între 0,5 mm și 300 mm. Puterea de separare a aparatului este de regulă 1/100 mm. Astfel de aparate dispun întotdeauna de un sistem de memorizare puternic (fig. 3-33 b), în vederea documentării și evaluării ulterioare în laborator a valorilor determinate în timpul controlului.

Pentru măsurători dimensionale în controlul calității se folosesc aparate cu dimensiuni proprii încă și mai mici (fig. 3-34), format de buzunar, care în câțiva ani vor deveni la fel de răspândite ca și șublerele mecanice (vezi par. 7.2).

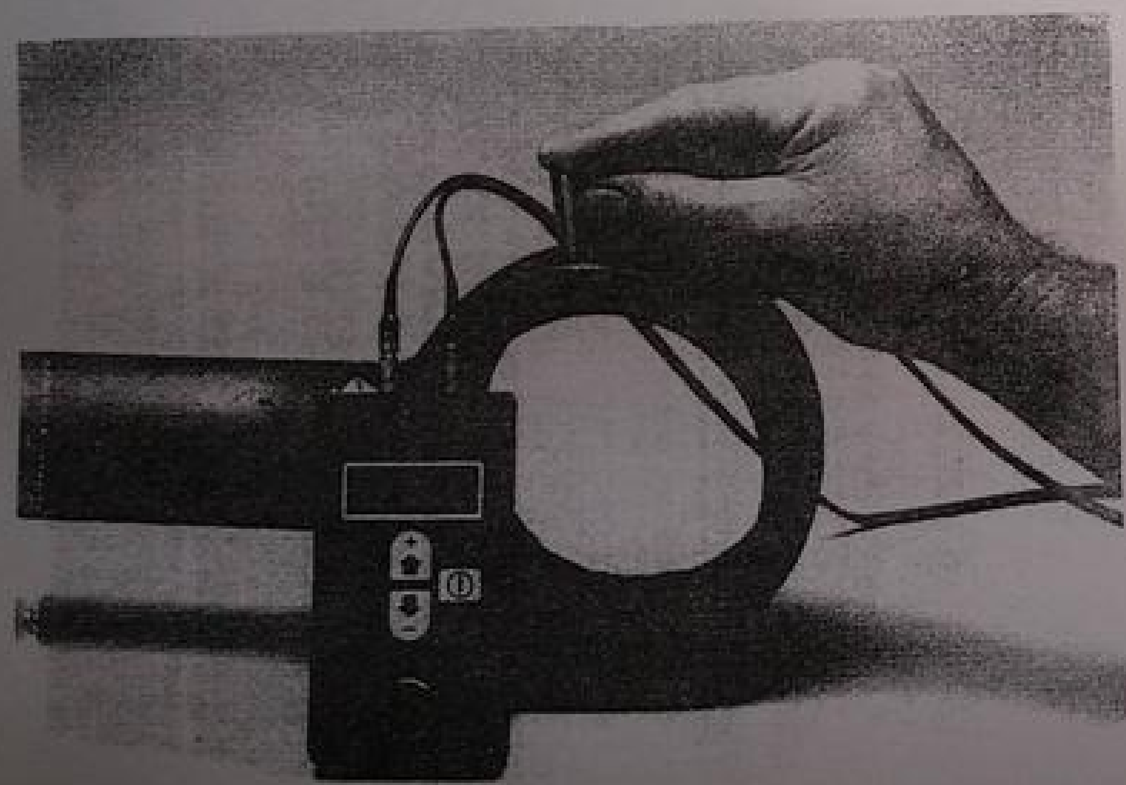


Fig. 3-34 Aparat digital de măsurarea grosimii, format de buzunar

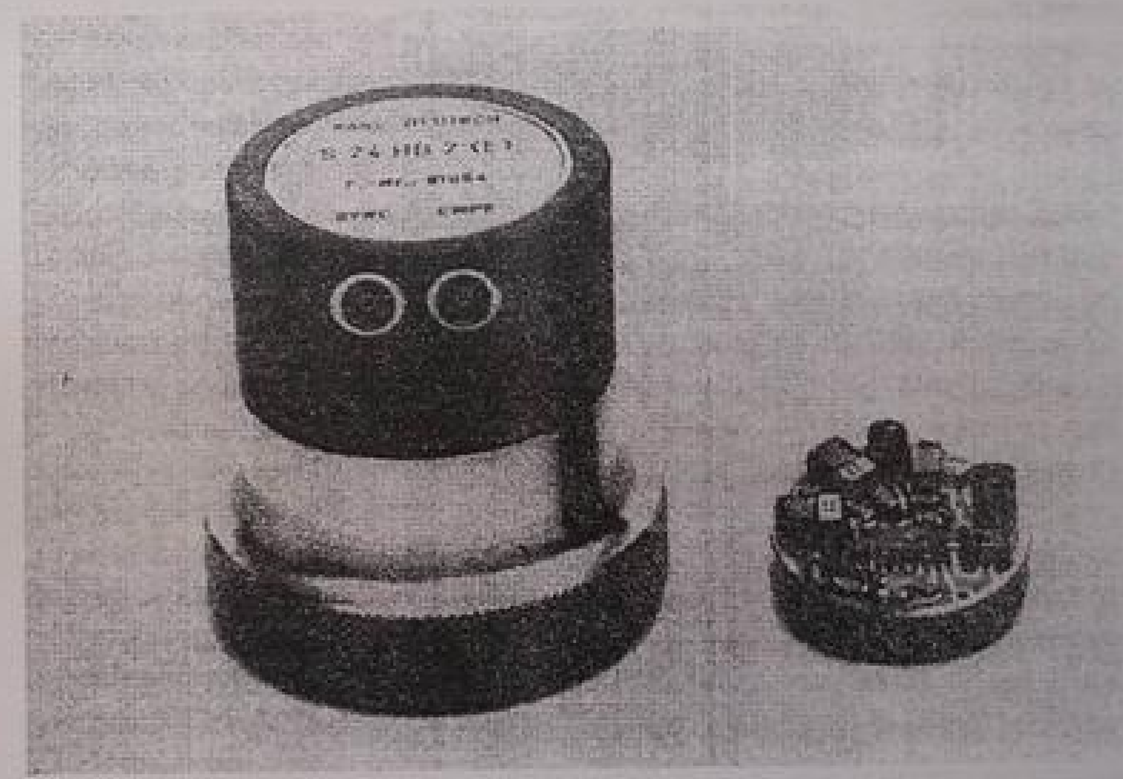


Fig. 3-35 Palpator ultrasonic cu electronică integrată

Câteodată se întâmplă ca defectoscopul ultrasonic să nu poată fi așezat în imediata apropiere a piesei de controlat și palpatorul să trebuiască să fie conectat printr-un cablu prelungit. Totuși rezultatele controlului sunt influențate de creșterea frecvenței și a lungimii cablului, căci semnalul electric este slăbit din cauza amortizării în cablu și este reflectat înainte și înapoi în cablul dintre aparat și palpator, din cauza impedanțelor electrice diferite. La o viteză de propagare a undelor electromagnetice în cablu de cca. $2 \cdot 10^8$ m/s, timpul de parcurs (dus-întors) într-un cablu lung de 20m are totuși valoarea de 20 nanosecunde. Reflexiile multiple pot avea ca urmare zone de interferență nedorite (similar situației impulsurilor ultrasonice), interferențe care pot falsifica complet ecourile ultrasonice ce se formează pe ecranul defectoscopului. Situația se remediază printr-un dispozitiv electronic dispus chiar lângă palpator, constând dintr-un emițător electric propriu și un amplificator de recepție cu impedanța de ieșire de 50Ω, dispozitiv care poate fi introdus în palpator, dacă este miniaturizat (fig. 3-35). Palpatorul este conectat la bornele de emisie și recepție ale aparatului ultrasonic printr-un cablu dublu. Semnalul de emisie al aparatului ultrasonic declanșează emițătorul electric propriu integrat în palpator, care este legat de oscilator. În situația recepției, semnalul electric generat de oscilator este preamplificat și trimis printr-un cablu cu impedanța de 50Ω, fără reflexii, spre borna de intrare a aparatului, care are de asemenea 50 Ω.

Fig. 3-36 Electronică de control pentru examinare automată cu mai multe canale

O viteză mare de control se obține atunci când, folosind mai multe palpatoare, sunt cuprinse simultan domenii cât mai mari din piesa controlată. De aceea electronica industrială de control cu ultrasunete pentru controale automate se bazează pe ideea mai multor canale de control și a funcționării în sistem multiplex.Fig. 3-36 prezintă un sistem electronic desemnat pentru 16 canale de control, respectiv 16 palpatoare sau multipli ai acestora. Reglarea fiecărui canal are loc printr-un program de dialog pe ecranul aparatului. Oscilatorul înglobat în partea de sus servește pentru prezentarea ecourilor ultrasonice, este însă necesar doar pentru verificare în cadrul procesului de calibrare a palpatoarelor. Amplitudinile și timpii de parcurs ai ecourilor sunt determinați și evaluați automat în timpul funcționării. Gestionarea datelor se realizează la nivelul unui calculator personal (PC). De aceea unor astfel de dispozitive îi sunt de regulă încorporate câte un PC. Sunt obligatorii de asemenea mufe pentru ieșiri de comutare, care să activeze macazul de sortare sau să declanșeze un sistem de marcare cu vopsea pe piesă în cazul constatării vreunui defect. Și aici electronica ultrasonică propriu-zisă este așezată în imediata apropiere a palpatoarelor, adică lângă piesa de controlat, prevăzută cu protecție contra picăturilor de apă și contra șocurilor. Dispozitivul robust de emisie și recepție, cu 8 canale, prevăzut în fig. 3-37 conține practic un aparat ultrasonic dirijat de la distanță, care trebuie să fie insensibil la șocuri mecanice și la perturbații electromagnetice, de care în principiu trebuie să se țină seama în halele industriale, ele fiind declanșate de ex. de instalațiile de sudură de înaltă frecvență. Mai multe detalii privind controlul ultrasonic automat se găsesc în capitolul 5.

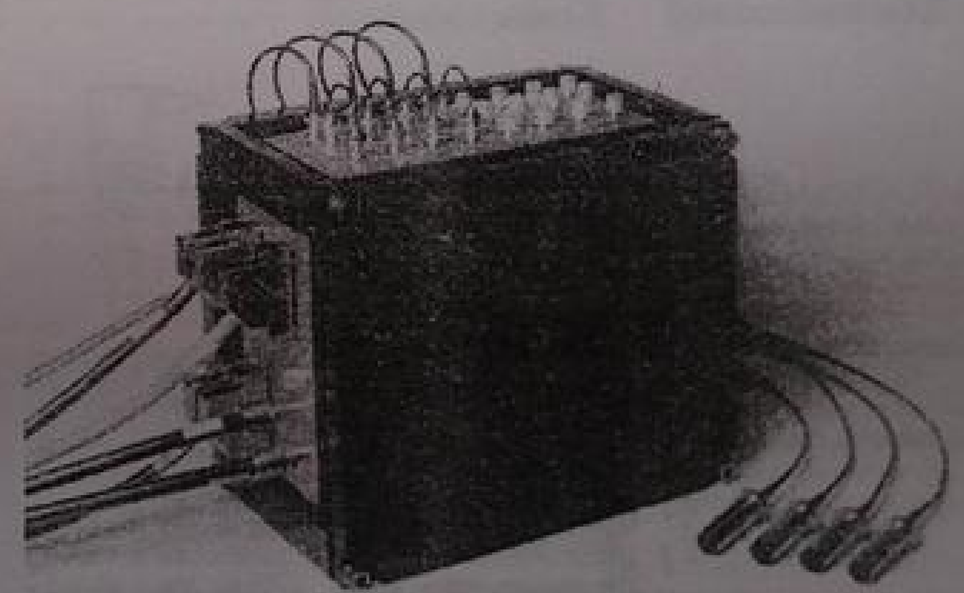


Fig. 3-37 Unitate de emisie-recepție cu 8 canale, pentru [illegible]

3.3 Metode de control cu ultasunete

Dacă în cadrul controlului ultrasonic, pentru detectarea unui defect este folosită partea din fasciculul sonic reflectată pe suprafața defectului, atunci se vorbește de *metoda prin reflexie* sau *prin ecou* (fig. 3-38). Suplimentul "prin impuls reflectat" sau "prin impuls și ecou" este corect din punct de vedere fizic, însă inutil, deoarece toate defectoscoapele obișnuite în practica CND generează în exclusivitate impulsuri. Dacă, dimpotrivă, se folosește partea din fascicul care trece prin defect sau lateral pe lângă acesta pentru detectarea acestui defect, se vorbește despre *metoda prin transmisie* (fig. 3-39). În mod normal, pentru detectarea defectelor este folosită metoda prin reflexie, întrucât prezintă avantaje remarcabile:

- din diferențele de timp parcurs se poate determina distanța până la un defect;
- sensibilitatea de detectare a defectelor mici este substanțial mai ridicată decât în cazul transmisiei;
- doar un singur palpator trebuie așezat și cuplat pe suprafață.

Calitatea cuplării nu este critică în cazul existenței unui ecou de fund care servește pentru comparație.

Față de aceasta, metoda prin transmisie oferă doar un singur avantaj: faptul că este parcurs doar un singur drum permite în anumite situații să se poată controla și materiale cu atenuare puternică.

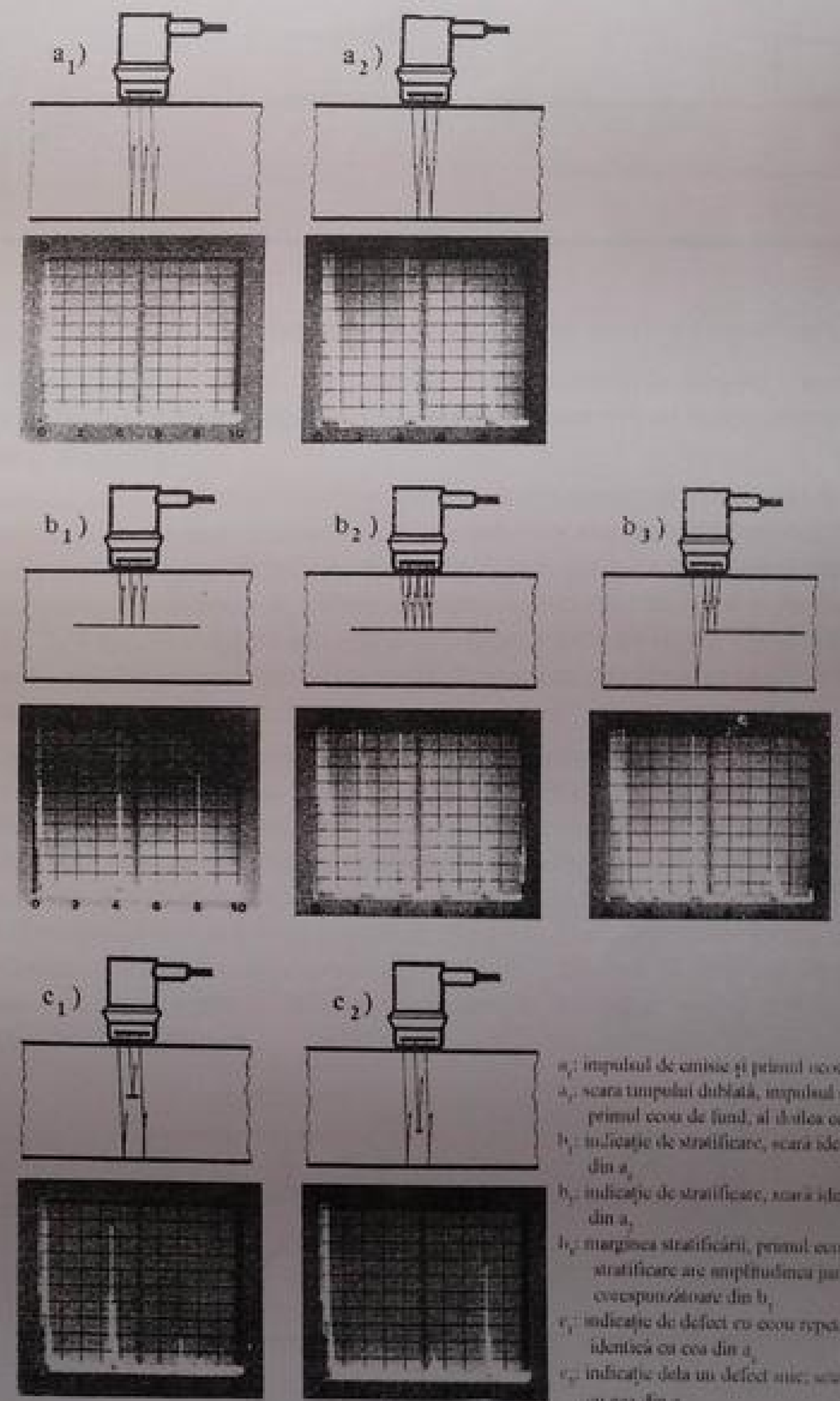
Împotrivă stau dezavantajele agravante:

- distanța nu poate fi stabilită;
- defectele mici sunt mai slab detectate;
- palpatoarele emițător și receptor trebuie așezate exact unul față de celălalt și trebuie foarte constant cuplate.

Ca urmare, în practică se aplică aproape în exclusivitate metoda prin reflexie, iar metoda prin transmisie doar când metoda prin reflexie nu dă rezultate concludente.

Independent de faptul că impulsul sonic este aplicat pe suprafața piesei perpendicular sau oblic, sub un anumit unghi, în principiu pentru metoda prin reflexie sunt necesare doar palpatoare monocristal (vezi par. 3.1.1). Pentru detectarea defectelor prin apropierea suprafeței se folosesc totuși și palpatoare SE.

La controlul tablelor cu ajutorul palpatoarelor normale, rezultă o diferență clară între tabla fără defecte, cu *defecte interne* mici și cu *stratificări* cu arii mari (fig. 3-38 a,b,c). În toate cazurile apar *serii de ecouri multiple*, căci după reflexia totală pe suprafața tablei opusă celei pe care se găsește palpatorul, doar o parte din impulsul sonic ajunge înapoi pe oscilator, cea mai mare parte din el rămâne în piesă, reflectat pe partea frontală și apoi pe cea opusă și în sfârșit o a doua parte a impulsului ajunge la oscilator după exact după dublul timpului de parcurs. Propagarea continuă cu energie sonică din ce în ma[illegible]ă. I[illegible]re o [illegible]le ec[illegible]u di[illegible]egal[illegible] ele [illegible]mpli[illegible]



a_1: impulsul de emisie și primul ecou de fund
a_2: scara timpului dublată, impulsul de emisie, primul ecou de fund, al doilea ecou de fund
b_1: indicație de stratificare, scara identică cu cea din a_1
b_2: indicație de stratificare, scara identică cu cea din a_1
b_3: marginea stratificării, primul ecou de la stratificare are amplitudinea jumătate din cea corespunzătoare din b_1
c_1: indicație de defect cu ecou repetat; scara identică cu cea din a_1
c_2: indicație dela un defect mic; scara identică cu cea din a_1

Fig. 3-38 Metoda prin reflexie sau prin ecou

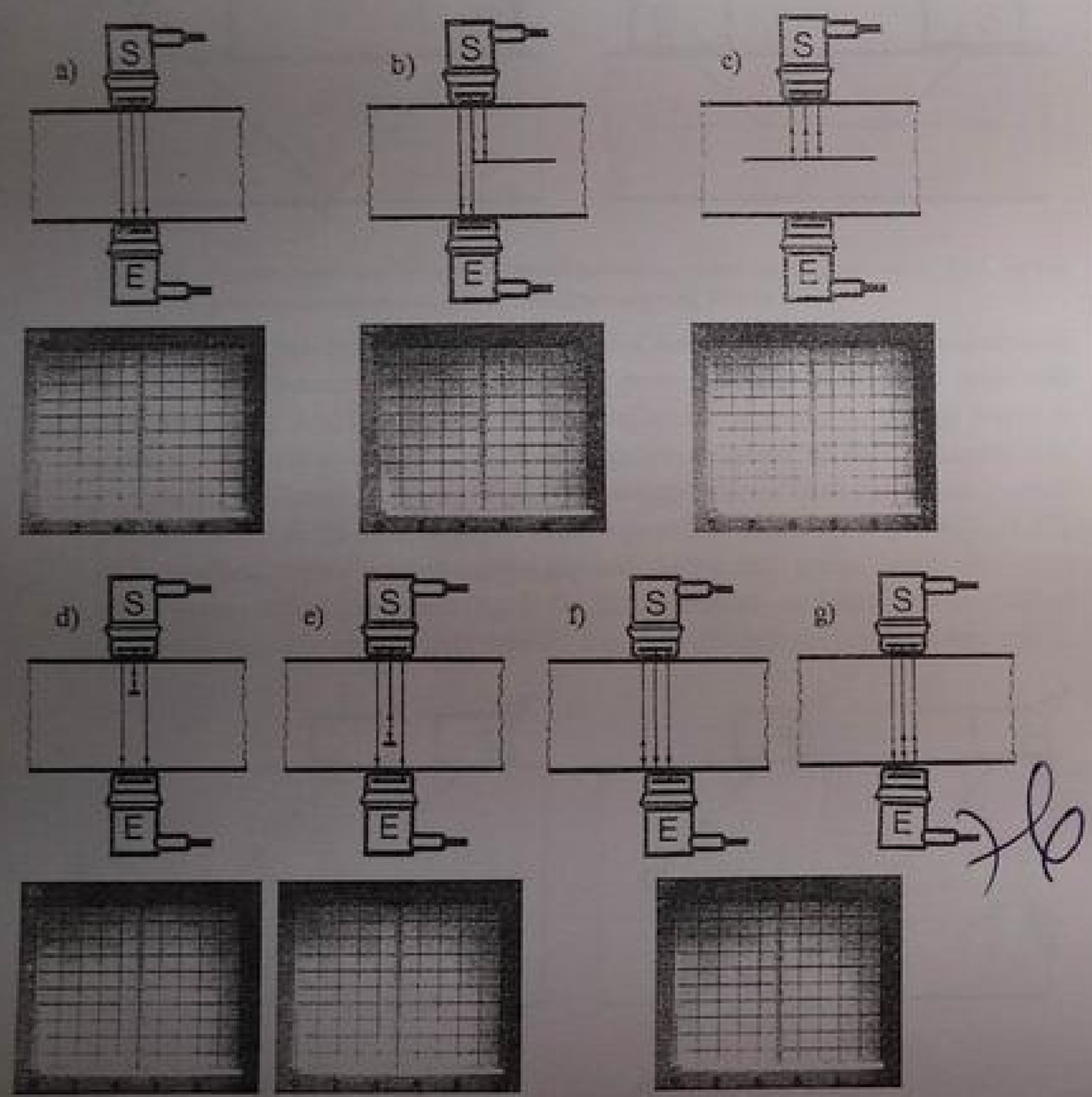


Fig. 3-39 Metoda prin transmisie

mereu mai reduse. Când palpatorul se găsește așezat cu întreaga sa dimensiune deasupra stratificării, apare de asemenea o serie multiplă de ecouri, la jumătate din distanță (fig. 3-38 b_1 și b_2). La limita stratificării, cele 2 serii de ecouri se suprapun (fig. 3-38 b_3). Același defect poate fi detectat și cu metoda prin transmisie. Pentru aceasta sunt necesari doi oscilatori, unul ca emițător, iar celălalt ca receptor. Presupunând o cuplare constantă și o aliniere a palpatoarelor, rezultă în cazul unei piese fără defecte o amplitudine

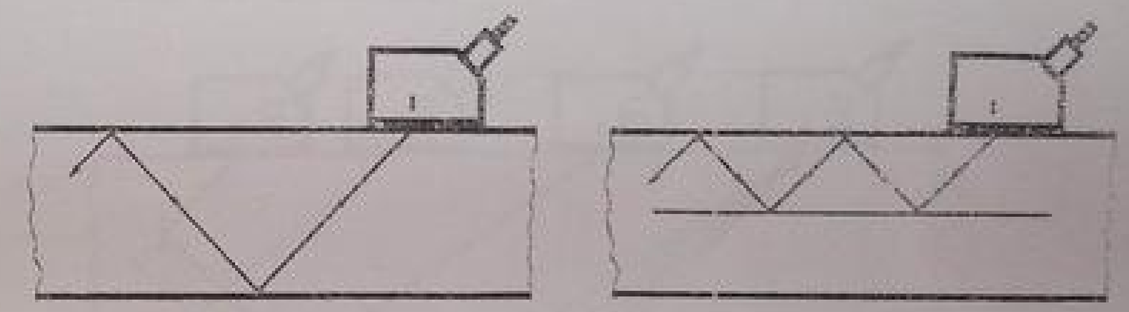


Fig. 3-40 Parcursul sunetelor la palpare oblică, în cazul unei table normale și al unei table cu stratificare

transmisă constantă (fig. 3-39 a). Aceasta se reduce în zona de margine a stratificării (fig. 3-39 b) și dispare complet atunci când stratificarea reflectă în întregime impulsul sonic (fig 3-39 c).

Substanțial mai nefavorabilă se dovedește metoda prin transmisie la detectarea defectelor interne mici. La metoda prin reflexie, zonele defecte cu extensie redusă se pot reprezenta clar prin mărirea amplificării aparatului (fig. 3-38 c_1 și c_2). La metoda prin transmisie, amplitudinea transmisă se reduce aproape neobservabil în cazul defectelor mici (fig. 3-39 d,e). Pe lângă aceasta apar și fenomene de difracție (fig. 2-19), ca și faptul că cel de al doilea palpator generează și alte nesiguranțe, prin alinierea sa și prin cea de a doua zonă de cuplare (fig. 3-39 f,g).

Detectarea stratificărilor se realizează la folosirea palpatoarelor unghiulare nu cu ajutorul reflexiei, ci prin transmisie. Reflexiile pe peretele de fund sau pe suprafața stratificării nu ajung înapoi la același palpator (fig. 3-40). Două palpatoare pot conduce la detectarea defectului când , similar cazului transmisiei cu două palpatoare normale, se realizează o aliniere constantă pentru jumătate din grosimea tablei (adâncimea stratificării) printr-o distanță fixă între cele două palpatoare (fig 3-41). O aliniere pentru întreaga grosime a tablei nu are efect pentru detectarea stratificării, deoarece în acest caz parcursurile sonice și comportările la reflexie pentru peretele de fund și pentru stratificare sunt identice (fig. 3-42).

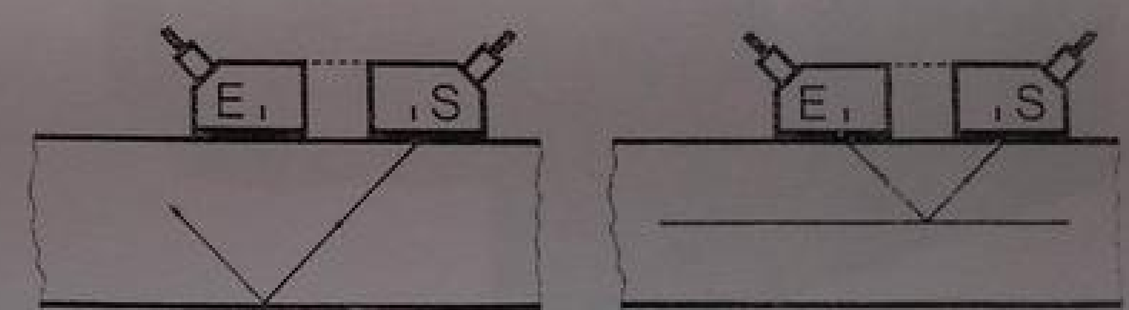


Fig. 3-41 Tehnica prin emisie-recepție cu palpatoare unghiulare pentru controlul stratificărilor în cazul dispunerii geometrice pentru jumătate din grosimea tablei.

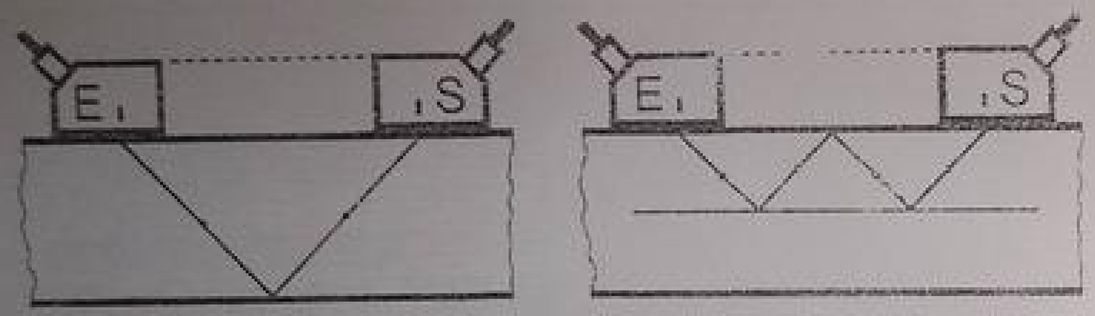


Fig. 3-42 Parcursul sunetelor în cazul dispunerii geometrice pentru întreaga grosime a tablei. Nu este posibil controlul stratificării (cu excepția marginilor stratificării)

În același mod funcționează așa-numita *tehnică tandem* pentru detectarea defectelor orientate perpendicular în cazul grosimilor peste cca.100mm, cu două palpatoare unghiulare (fig. 3-43). Partea din fascicul reflectată de defect nu ajunge înapoi la palpatorul de emisie, ci este detectată de un palpator separat, cu rol de receptor. Este necesară de asemenea o aliniere (distanță) constantă a celor două palpatoare. Această distanță trebuie să fie diferită pentru diferite poziții în adâncime (fig. 3-43) [31,32]. Dacă întreaga grosime a piesei trebuie cuprinsă dintr-o dată, atunci fie trebuie aliniate mai multe perechi de palpatoare (fig. 3-43), fie un emițător cu deschidere unghiulară a fasciculului suficient de mare trebuie dispus la distanțe corespunzătoare față de

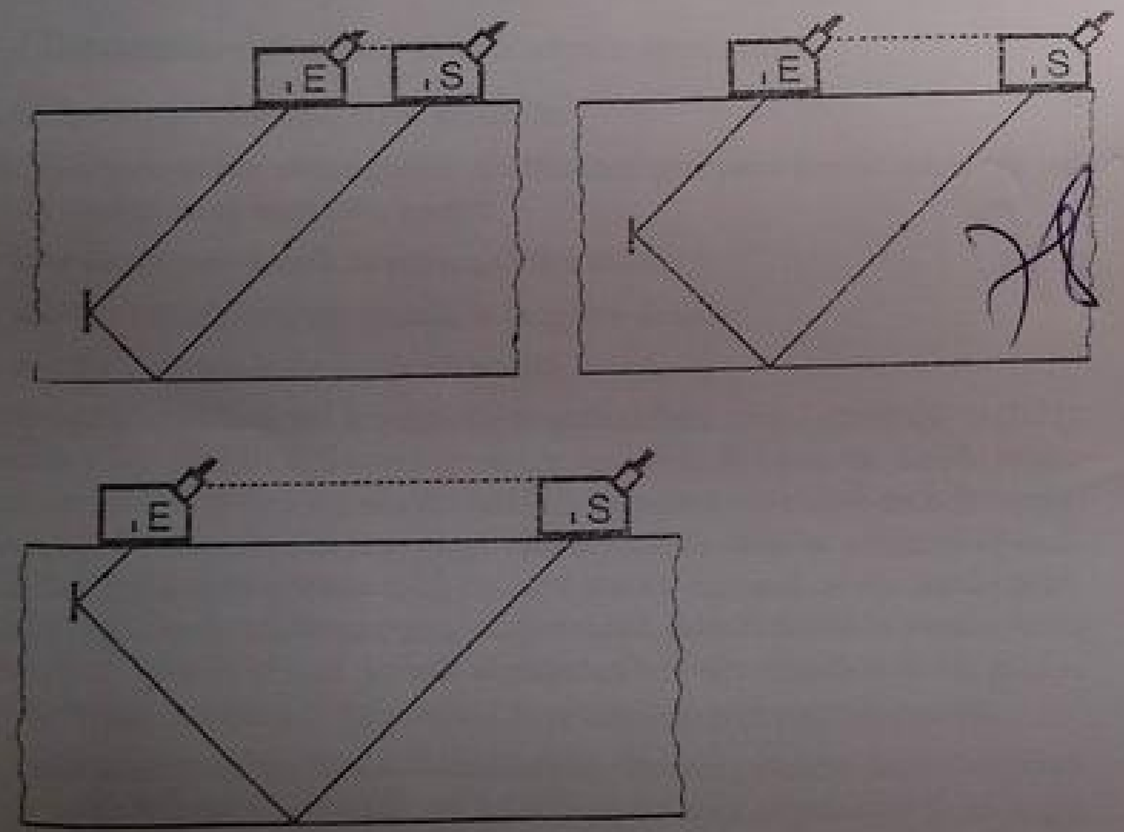


Fig. 3-43 Principiul controlului prin tandem

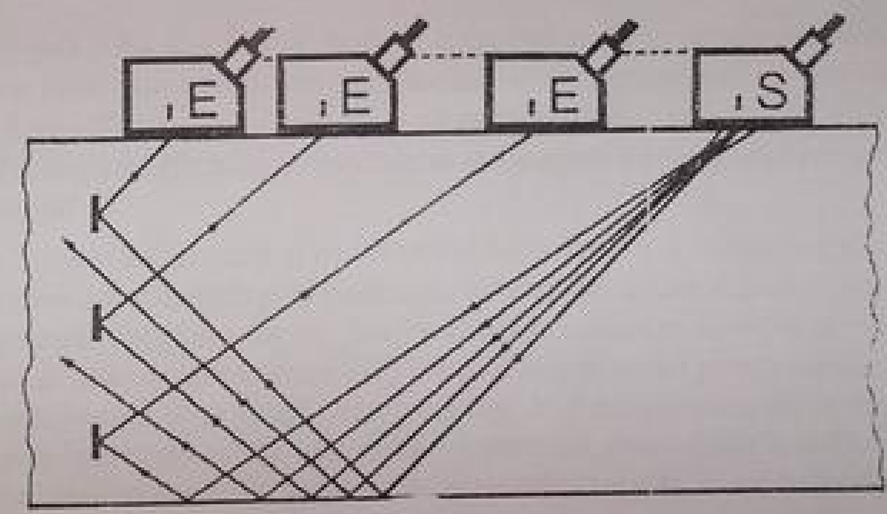


Fig. 3-44 Tehnica tandem folosind emițător cu fascicol larg

mai multe palpatoare receptoare (fig. 3-44). Pentru un control m[illegible] folosește [illegible] mod normal doar o pereche de palpatoare, poziționate variabil într-o montura [illegible] de adâncimea zonei cercetate (fig 3-45).

Pentru completare, trebuie amintită așa-numita *tehnică delta*. A fost inițial folosită în SUA, purtând denumirea "pitch and catch" [33].

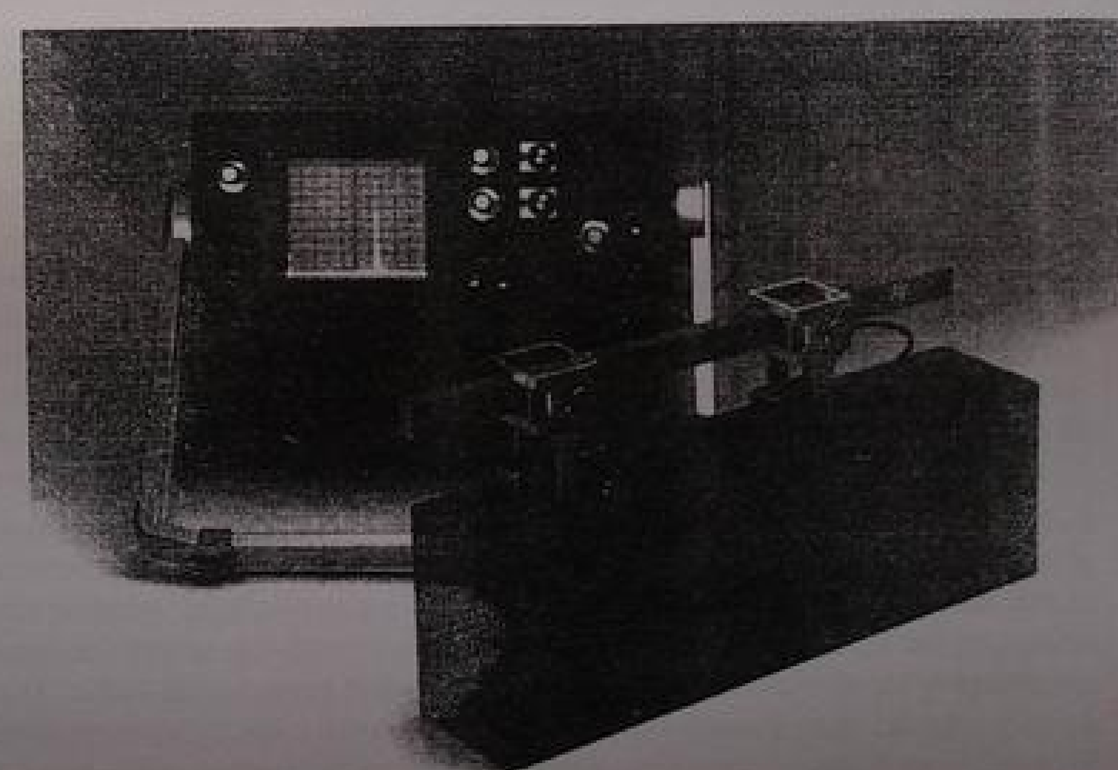


Fig. 3-45 Sistem modular de fixare palpatoare în tandem pentru control manual

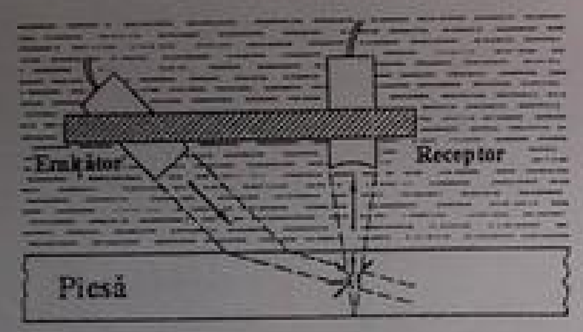


Fig. 3-46 Tehnica Delta, principiu [15]

Aici se trimite în piesa de controlat, adesea o îmbinare sudată care transmite greu undele sonice, o undă transversală într-o direcție înclinată. Un palpator receptor așezat perpendicular deasupra piesei va recepționa undele longitudinale care apar la marginea zonei defecte (fig. 3-46). Cuplarea uniformă necesară este asigurată de o baie de apă în tehnica prin imersie (vezi cap.5)

Lucrări suplimentare pentru acest subiect, sunt printre altele [34,35].

3.4 Detectarea defectelor și calibrarea aparatelor

3.4.1 Ipoteze privind detectarea defectelor

Pentru detectarea unei neomogenități din interiorul unei piese trebuie îndeplinite mai multe condiții. Neomogenitatea trebuie:

- să se deosebească acustic de materialul fără defecte;
- să aibă o mărime minimă raportată la lungimea de undă;
- să reflecte către palpator suficientă energie sonică.

Diferența acustică se referă la rezistența sonică conform formulelor (2-20) și (2-21), precum și fig. 2-20. Ea este mereu aceeași, independent de frecvență. Zonele defecte mai mici decât 20% din lungimea de undă (0,2 ·λ) nu sunt detectabile decât în condiții favorabile. Valoarea minimă poate crește până la jumătate sau chiar o lungime de undă. Deci dacă trebuie găsite defecte mici, trebuie folosită o frecvență cât mai înaltă posibil. O frecvență ridicată este de asemenea mai favorabilă, datorită deschiderii mai reduse a fasciculului sonic în câmpul depărtat al palpatorului (vezi formulele (2-13) până la (2-16)); totuși materialul de bază trebuie să nu atenueze prea puternic sunetele.

În marea majoritate a cazurilor este folosită pentru detectare partea din fascicul reflectată de suprafața defectului. Afirmația este valabilă pentru toate palpatoarele cu un singur oscilator, pentru palpatoare SE și chiar pentru tehnica prin tandem. Dispunerea geometrică a palpatoarelor și alegerea direcției de palpare trebuie să fie dirijate în funcț[illegible]ul d[illegible]lui c[illegible]ie de[illegible], de f[illegible] și dim[illegible]nile [illegible] cont[illegible]

Distanța până la reflector poate fi măsurată și dimensiunile acestuia pot fi evaluate doar când partea reflectată din fascicul se distinge cu suficient de mare amplitudine față de reflexiile perturbatoare și de zgomotul electronic (vezi par. 3.4.3). Suprafața reflectantă a defectului trebuie mereu să fie atinsă pe cât posibil perpendicular de către fascicul.

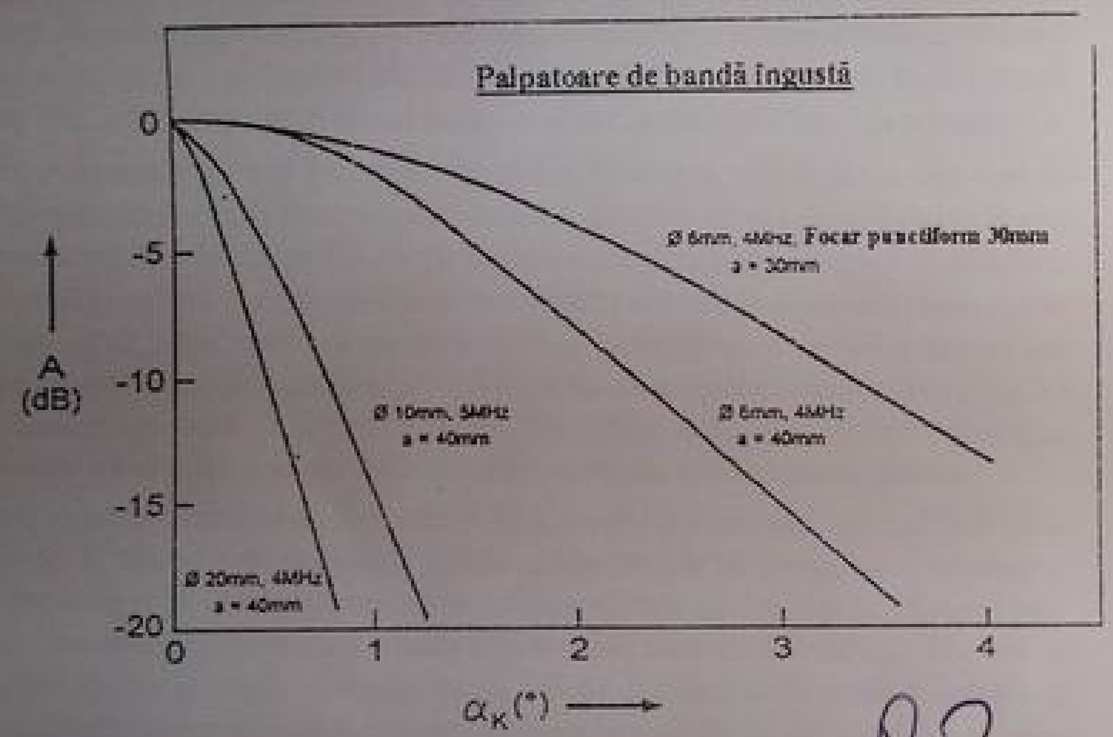
În funcție de frecvență și de diametrul oscilatorului, o înclinare a planului defectului de chiar o fracțiune de grad poate avea ca urmare o reducere semnificativă a amplitudinii reflectate. Diagrama din fig. 3-47 prezintă rezultatul unui studiu privind *sensibilitatea față de unghiul de înclinare* [37] în cazul palpatoarelor pentru tehnica prin imersie cu bandă îngustă și cu bandă largă (vezi cap. 5). Pentru acestea din urmă sunt indicate în figură frecvențele limită, inferioară și superioară, determinate la -6dB. Este reprezentată amplitudinea ecoului A provenit de la un reflector plan în apă în funcție de unghiul de înclinare α_K al palpatorului față de dispunerea plan-paralelă a palpatorului și reflectorului. Este menționată și distanța a dintre palpator și reflector. Se observă că sensibilitatea la unghiul de înclinare este cu atât mai mare, adică scăderea semnalului este cu atât mai puternică cu cât

- este mai înaltă frecvența, la același diametru al oscilatorului;
- este mai mare diametrul oscilatorului, la aceeași frecvență.

Pentru o explicație fizică a acestor relații, să observăm fracțiunile din fascicul care pornesc din punctele cele mai depărtate între ele ale suprafeței oscilatorului și care se reîntâlnesc tot acolo după reflexii pe piesa controlată: cu cât este mai mare oscilatorul și cu cât este mai înaltă frecvența, cu atât mai mare este diferența de fază și cu atât mai mult se anulează tensiunile corespunzătoare recepționate de elementul piezoelectric. Doar în cazul unei dispuneri plan - paralele se întâlnesc în fază toate fracțiunile din fascicul, tensiunile de recepție amplificându-se.

Cea mai redusă sensibilitate este obținută printr-o localizare punctiformă suplimentară a palpatorului. Acest efect este folosit la măsurătorile de grosime pe table sau țevi cu coroziune pătrunsă: focalizarea punctiformă împiedică dispariția totală a ecoului provenit de la o adâncitură înclinată a suprafeței de fund, căci focalizarea micșorează fasciculul sonic. Această reducere acționează similar cu o micșorare a diametrului oscilatorului. În cazul coroziunii suprafeței cu porozități de ordinul lungimii de undă, nici focalizarea punctiformă nu mai este de ajutor, ci doar o scădere a frecvenței de examinare, astfel încât lungimea de undă să fie mai mare decât structura suprafeței.

Absorbția și împrăștierea în material (vezi par. 3.5) reduc posibilitatea de detectare a defectelor. În vreme ce absorbția (fig 3-48) se întâlnește mai mult sau mai puțin în orice material, împrăștierea are loc în materialele cristaline, de ex. metalele, sau în materialele întărite prin fibre, ca de ex. GFK. Ambele fenomene se amplifică în corpurile solide odată cu creșterea frecvenței de control, absorbția - direct proporțional, împrăștierea cu puterea a patra (f^4). În plus apare și o dependență de temperatură, care în cazul materialelor plastice poate fi foarte complexă. În cazul apei, absorbția ultrasunetelor crește cu f^2 și cu presiunea statică și scade cu creșterea temperaturii. O reflexie redusă datorată absorbției devine chiar neobservabilă din cauza indicatiilor



82

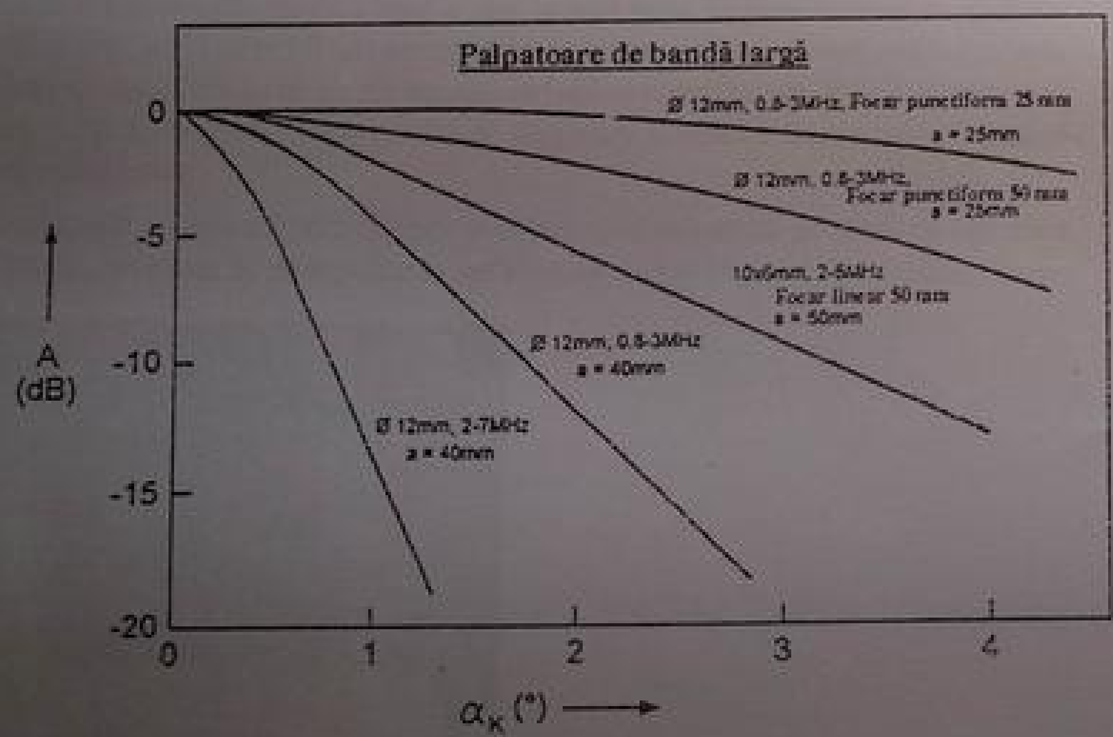


Fig. 3-47 Scăderea semnalului ecoului de la suprafațadefectului, A, în dB, la modificarea unghiului de polpare cu valoarea α_K

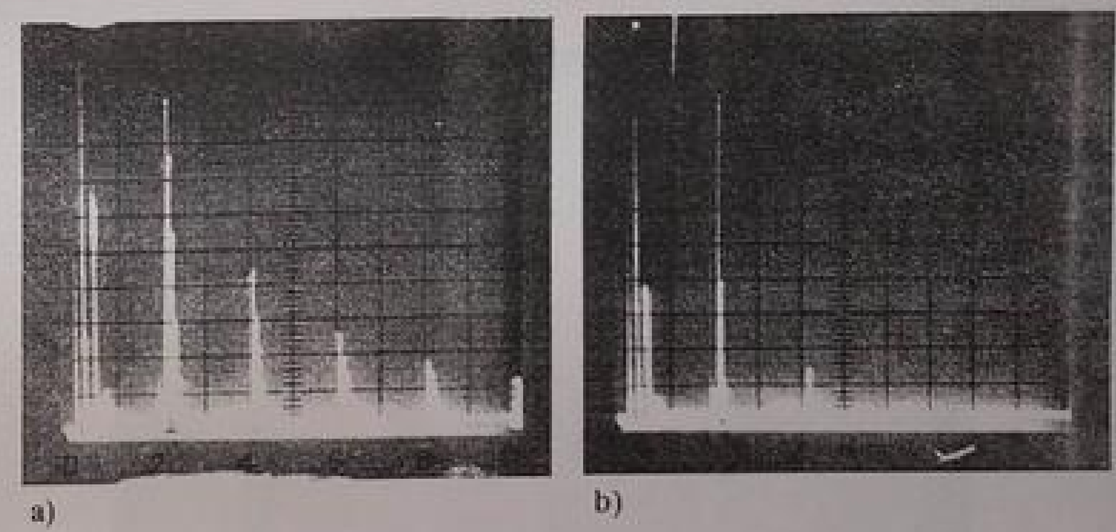


Fig. 3-48 Exemple de absorbții diferite; a) absorbție redusă (25 mm oțel); b) absorbție ridicată (10mm PVC) - seria de ecouri s[illegible] mai repede

datorate împrăștierii (*zgomot de structură*) (fig. 3-49). Pentru o recunoaștere sigură este necesară o distanță suficientă a semnalului fața de zgomotul de structură, de obicei minim 6dB.

În cazul unui zgomot de structură prea ridicat este neapărat necesară o reducere a frecvenței de examinare. Prin aceasta se reduce și sensibilitatea de detectare a defectelor mici. Alegerea corectă a frecvenței este deci întotdeauna un compromis. Frecvența ideală trebuie de regulă determinată prin încercări prealabile (vezi par. 3.1.1). Zgomotul electronic al aparatului are de cele mai multe ori un nivel de fond mult mai redus decât

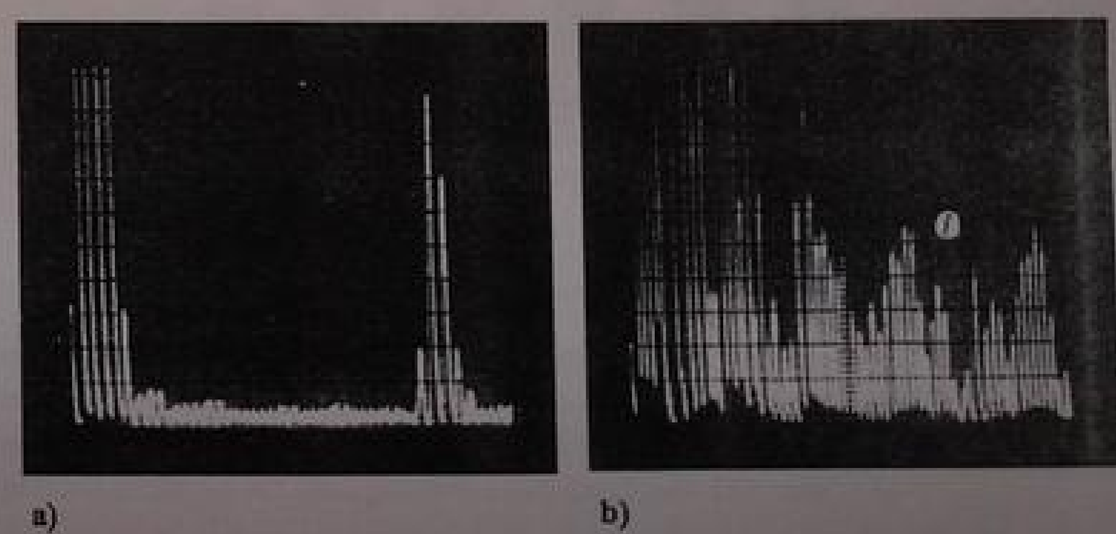


Fig. 3-49 Indicații de a) atenuare redusă și b) atenuare puternică datorită granulației ("zgomot de material"), țeglă de alamă (80 mm); a) extrudată; b) turnată;

zgomotul de structură. Acest nivel depinde de construcția amplificatorului și din motive fizice se mărește substanțial odată cu amplificarea și cu lățimea de bandă. Se poate recunoaște printr-o neclaritate statistică și o amplitudine constantă pe toată baza de timp (fig. 3-50) și este de cele mai multe ori diferit la diferitele tipuri de aparate.

Printre ipotezele privind detectarea sigură a defectelor se află și aceea care cere ca indicația de defect să nu fie confundată cu alte indicații ce provin din alte cauze. Pentru aceasta trebuie verificat pe desenul piesei dacă indicații ca cele provenind de la defecte din zona examinată ar putea proveni de la reflectori existenți în geometria piesei. Astfel de *ecouri de formă* provin de ex. de la muchii, canale, fileturi, orificii interioare etc. Prin trasarea direcției de palpare care trebuie folosită se poate eventual stabili o tehnică de control mai bună. În astfel de situații, nu trebuie luată în considerare doar raza mediană a fasciculului sonic, ci și extinderea acestuia, adică și razele laterale.

Dacă palparea trebuie să se facă paralel cu o muchie a piesei sau, în cazul unei piese înguste, în lungul axei unei bare, atunci razele laterale incidente, ușor înclinate și propagându-se în apropierea suprafeței suferă o reflexie sub un unghi egal cu cel incident. Simultan însă se despică o undă transversală, conform formulei (2-22), sub un unghi față de normală mai mic decât cel de incidență. Această despicare și retransformarea corespunzătoare se pot produce în orice loc pe parcursul dus-întors al undelor. Timpul de parcurs al acestor unde despicate este întotdeauna mai mare decât cel al undei longitudinale care se propagă pe axă și se reflectă pe aceeași direcție. Din acest motiv indicațiile suplimentare dintre primul ecou de fund și ecourile multiple acestuia (fig. 3-51) nu pot fi fals interpretate. Pe ecran, astfel de *ecouri secundare* apar la distanțe exact definite în spatele ecoului de fund. Aceste distanțe depind de diametrul barei, ca și de frecvența fenomenului de despicare a undelor transversale în cadrul parcursului sonic.

Fenomenul trebuie luat în considerare și atunci când palpatorul se așază pe suprafața curbată a unei piese, de ex la palparea radială a unei bare (fig. 3-52). Fasciculul sonic

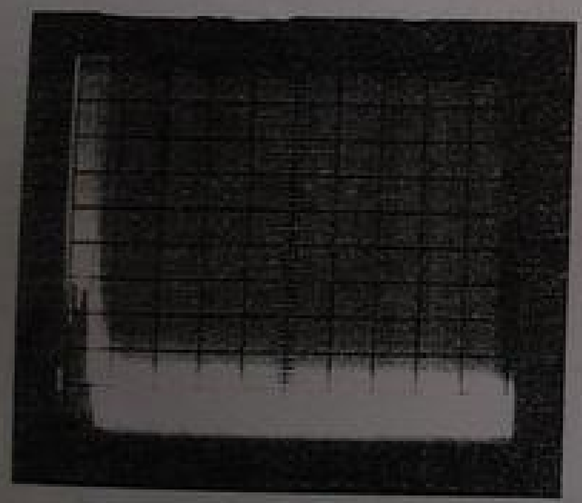
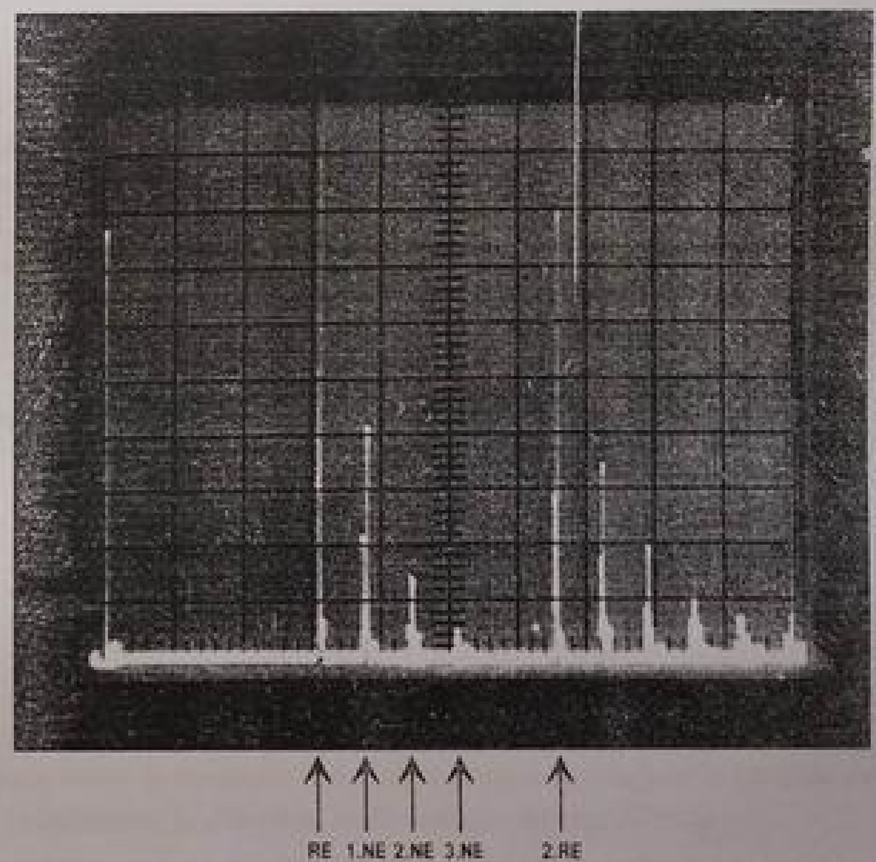


Fig. 3-50 Zgomot electronic la amplificare ridicată



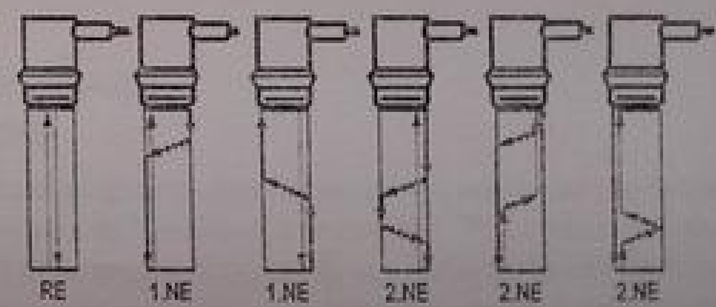
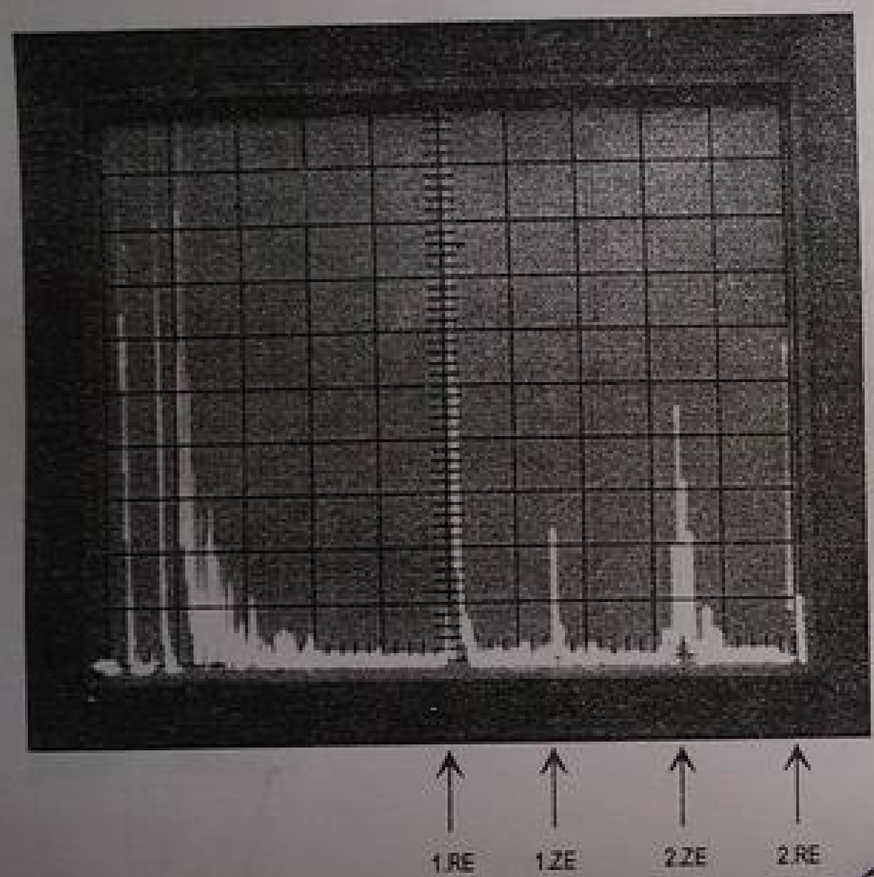


Fig. 3-51 Apariția ecourilor secundare (NE) din cauza despicării undelor. RE: ecou de fund

se lărgește și apar reflexii în formă de triunghi, cu sau fără transformare de undă. De altfel, ecourile secundare și *ecourile suplimentare* de acest tip se pot evalua tehnic, nu numai pentru măsurători geometrice, ci și la măsurarea vitezelor undelor longitudinale și transversale, atunci când geometria este cunoscută (vezi par. 7.3).

Din cauza dependenței unghiulare a fracțiunilor din fascicul reflectate și despicate, amintită deja în paragraful 2.3.3, la palpatoarele unghiulare cu diferite unghiuri de palpare se pot întâlni diferențe mari de amplitudini. Este în special cazul unghiului de palpare de 60° în oțel. Unda longitudinală apărută suplimentar ca urmare a *reflexiei în*



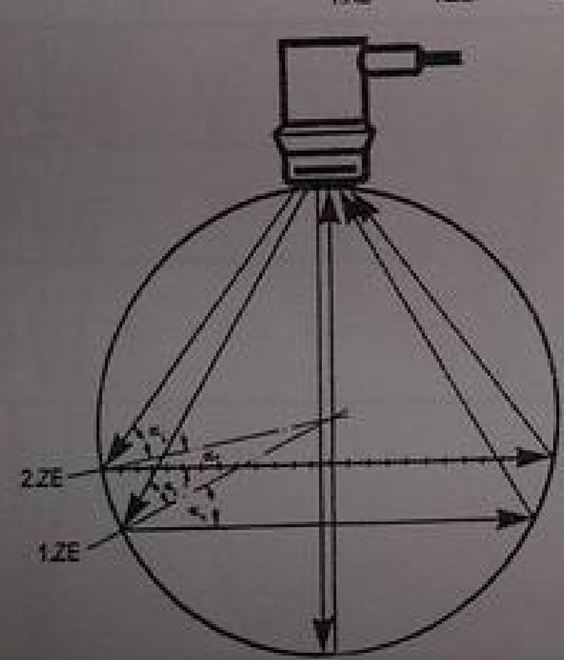


Fig. 3-52 Apariția ecourilor suplimentare (ZE) fără (1.ZE) și cu transformarea undei (2.ZE). RE: ecou de fund. Unghiurile α_L și α_T rezultă din legea refracției.

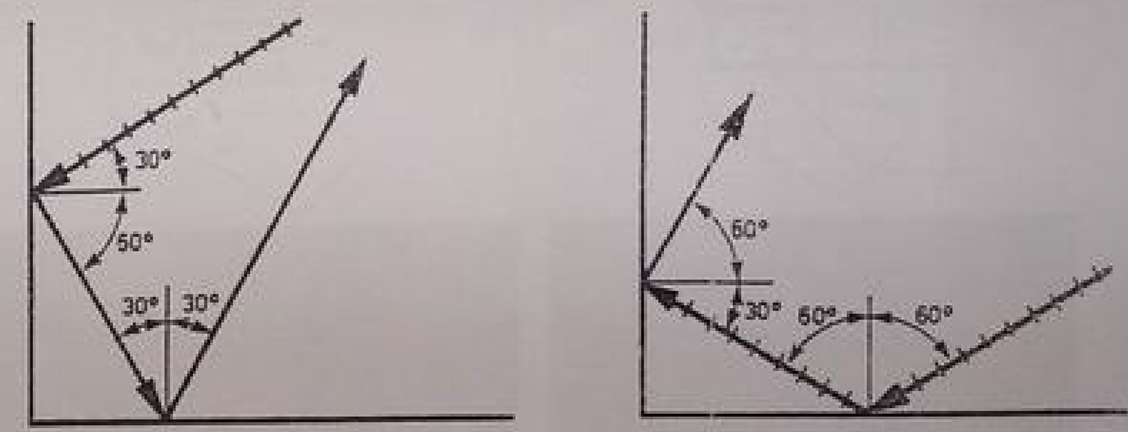


Fig. 3-53 Transformare puternică de undă în cazul palpatoarelor unghiulare de 60° la marginile tablei (transformare de undă 61°/29°, cca ± 4°)

oglindă pe două muchii perpendiculare are amplitudinea maximă (fig. 3-53). Ea absoarbe energia undei transversale, încât sensibilitatea de control este redusă, și în plus poate genera interpretări greșite din cauza indicațiilor eronate. Fenomenul nu se poate petrece totuși la controlul obișnuit al îmbinărilor sudate în table de dimensiuni mari, dar se întâlnește la alte piese cu forme geometrice diferite.

Pentru completare, trebuie precizat că ecourile fantomă explicate mai exact în secțiunile 3.2 și 5 pot masca indicații de defecte.

3.4.2 Calibrarea distanței

3.4.2.1 Generalități

Un avantaj substanțial al controlului ultrasonic în comparație cu metoda radiografică constă în posibilitatea de "localizare a defectului". Prin aceasta se înțelege capacitatea de a putea stabili unde se găsește suprafața unui reflector în interiorul grosimii pătrunse a piesei. Pentru aceasta este necesară o calibrare precisă a defectoscopului. Impulsul de emisie nu ar trebui să fie folosit, din cauza timpilor suplimentari de parcurs (fig.3-20) în straturile protectoare și în penele de întârziere, ca și din cauza comportării palpatoarelor la amorsarea oscilațiilor. Eroarea apărută din aceste cauze devine totuși mai mică odată cu creșterea lungimii de controlat și poate fi de ex. neglijată la incidență perpendiculară cu palpator normal la peste 100mm oțel. Pentru o etalonare mai exactă se pot folosi ecouri de la distanțe diferite într-o piesă fără defecte, de ex. ecouri multiple. Ecourile trebuie așezate pe diviziunile scalei corespunzătoare domeniului de examinare stabilit, folosind *butonul de deplasare a scalei*(ecoul de calibrare de la distanța mai mică) și *butonul de domeniu de lucru* (ecoul de calibrare de la distanță mai mare). După aceste operații, flancul ascendent al impulsului de emisie se găsește la stânga punctului zero, corespunzător timpului de parcurs suplimentar, iar diviziunile scalei

redau exact distanța în obiectul examinat. Distanța unui ecou de defect se poate citi ca fracțiune corespunzătoare din grosimea totală. În acest scop se aleg domenii de lucru cu valori numerice rotunde, de ex. 10, 100 sau 1000 mm sau fracțiuni din acestea, care pot fi stabilite ușor și fără calcule. În practică, s-au dovedit convenabile treptele 5-10-20-50-100 și următoarele. Când se cunoaște grosimea materialului, din poziția ecourilor de fund se poate controla dacă viteza sonică de propagare corespunde valorii prezentate. În mod obișnuit, calibrarea distanței se realizează chiar pe materialul de examinat, cel puțin în cazul palpării normale.

În cazul palpatoarelor SE, undele se propagă ușor înclinat, condiționat de construcția acestui tip de palpatoare, înclinarea fiind cu atât mai mare cu cât este mai mare unghiul de acoperiș și cu cât este mai mică distanța reflectorului față de suprafață (fig. 3-54). *Eroarea de ocolire* cauzată de această formă a parcursului nu se poate evita, dar poate fi distribuită printr-o calibrare specială, încât să devină practic neglijabilă. În practică s-a dovedit corespunzătoare o etalonare iterativă (alternantă) cu câte un prim ecou de referință de la cca 10-20% și 80-100% din domeniul de control stabilit.

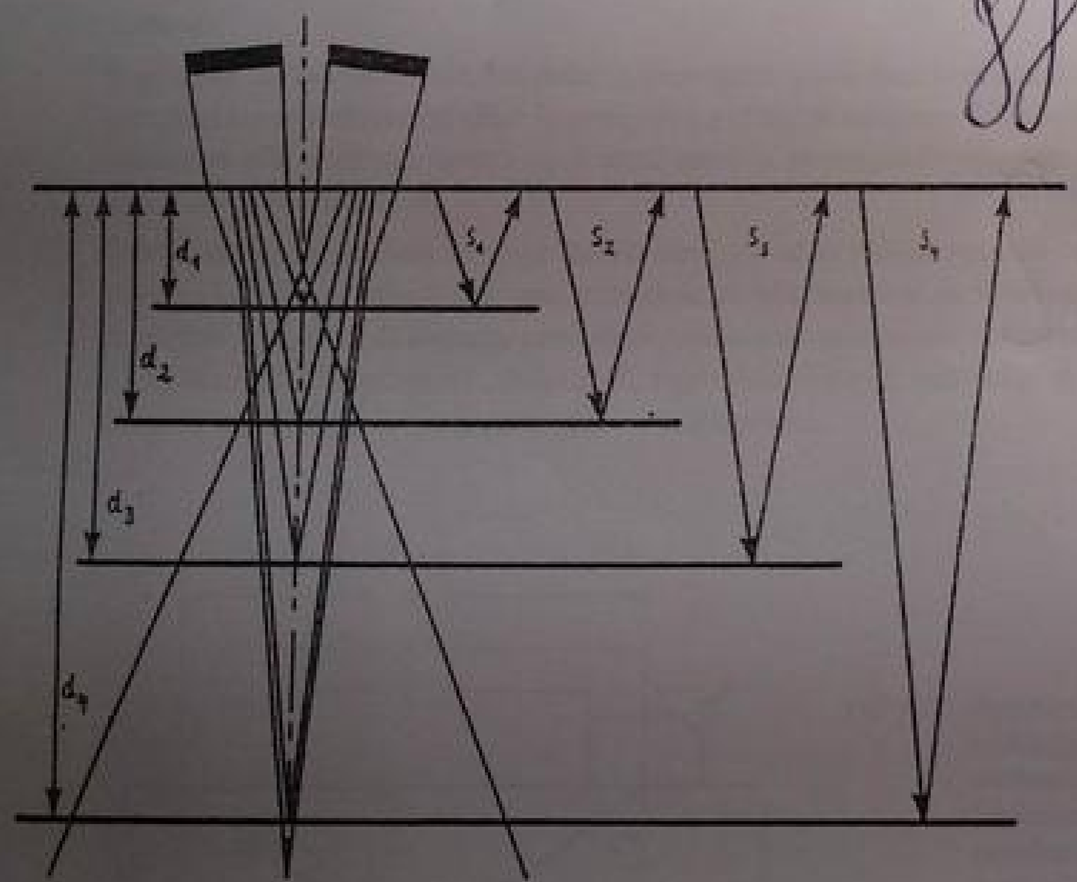


Fig. 3-54 Apariția erorii de ocolire (schematic) la palpatoare SE; d: grosimea, s: drumul sonic

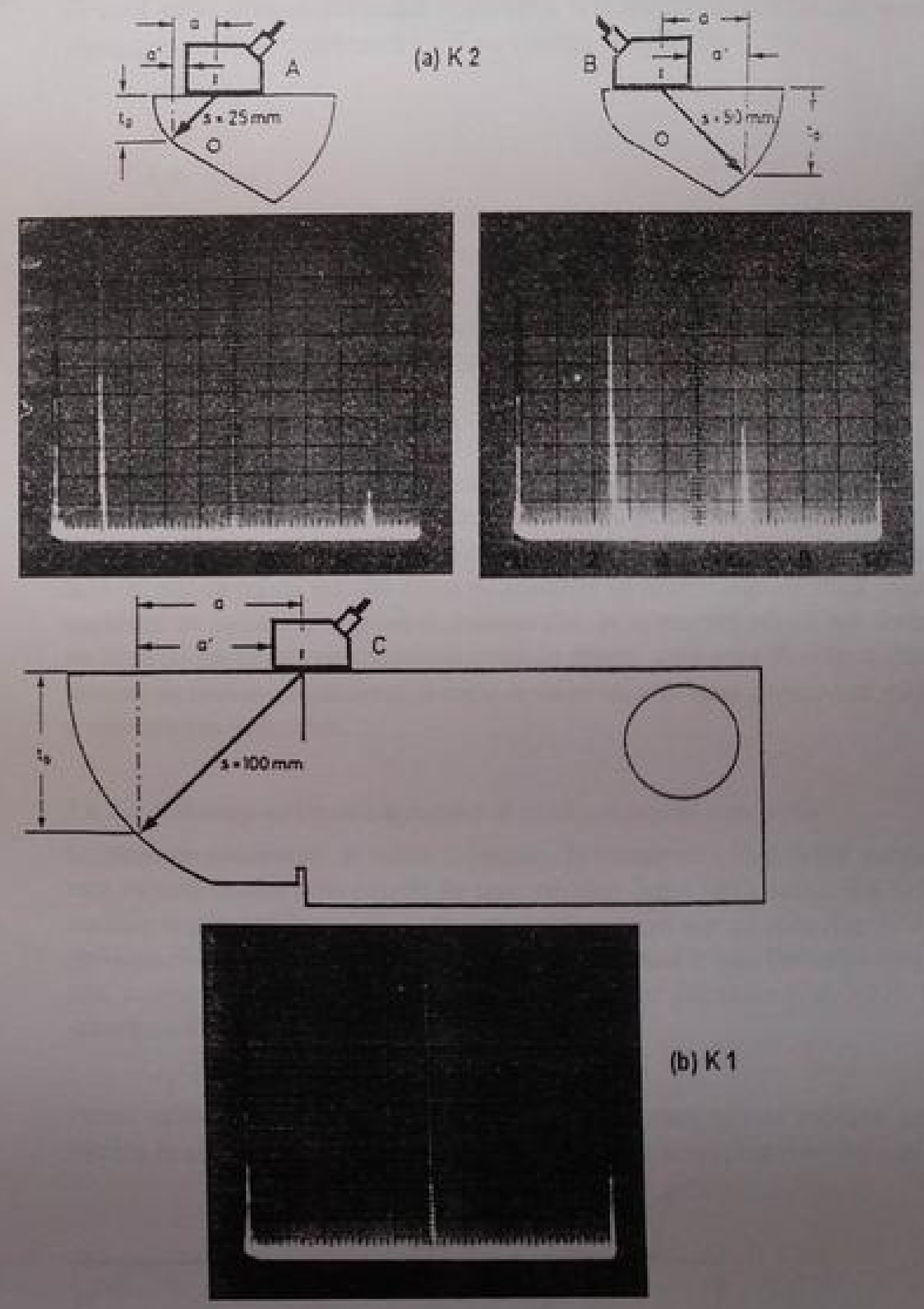


Fig. 3-55 Blocuri de etalonare normate și seriile de ecouri care iau naștere. Domeniul de distanță: 200 mm unde transversale (oțel); a) K2; b) K1

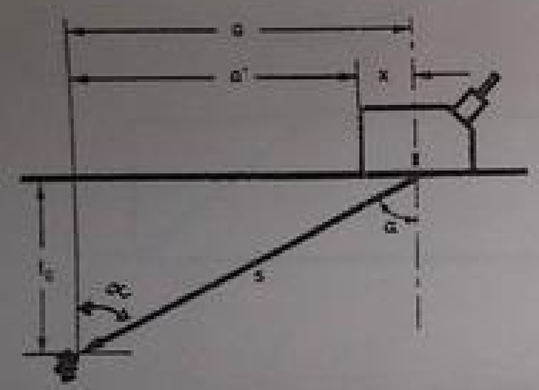


Fig. 3-56 Palpator unghiular pe suprafață plană, fără reflexie (citire directă)
a: distanța proiectată
a': distanța proiectată redusă
s: drumul sonic
t_0: măsura în adâncime
x: indexul palpatorului

La folosirea palpatoarelor unghiulare, de ex. pentru controlul îmbinărilor sudate, sunt utilizate de obicei blocurile de etalonare normate internațional K1 și K2 (fig. 3-55). Pentru poziții corecte ale palpatorului se obțin reflexii de la distanțe stabilite, care pot fi utilizate pentru calibrarea indicațiilor de pe ecran. Pentru siguranță se poate controla, de ex. pe o muchie a materialului, dacă viteza de propagare în etalon coincide cu cea din materialul de examinat. Dacă sunt diferite, atunci trebuie să se ia în considerație că și unghiul de palpare se modifică odată cu viteza, conform formulei (2-22) a legii refracției.

În practică, etalonarea se face mai puțin în *drum sonic* și mai mult în *distanță proiectată* completă sau redusă, uneori chiar în proiecție a *poziției în adâncime* (fig. 3-56). Aceste mărimi se află în relație liniară cu drumul sonic și se pot determina prin calcul, pe desen sau prin măsurători.

90

Cunoscând aceste mărimi se poate stabili mai ușor unde trebuie aplicată operația de reparare în vederea îndepărtării unei zone defecte. Mărimea a se mai numește distanță proiectată, a' reprezintă *distanța proiectată redusă* care se măsoară din partea frontală a palpatorului. Diferența lor, *indexul X*, reprezintă distanța *punctului de ieșire al fasciculului sonic* până la partea frontală a palpatorului.

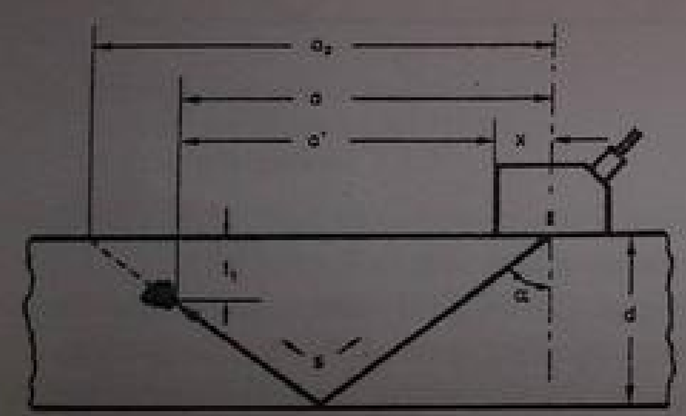


Fig. 3-57 Palpator unghiular pe o tablă plană, cu schimbarea direcției fasciculului pe suprafața inferioară (undă reflectată)
t_1: măsura în adâncime
d: grosimea tablei

Drumul sonic, distanța proiectată și proiecția în adâncime se pot calcula, unele din altele, prin funcțiile trigonometrice. Sunt valabile relațiile (fig. 3-56):

$$a = s \cdot \sin\alpha \tag{3-6}$$

$$a' = a - X \tag{3-7}$$

$$t_0 = s \cdot \cos\alpha \tag{3-8}$$

unde a este distanța proiectată, a' este distanța proiectată redusă, s este drumul sonic, t_0 este măsura în adâncime (fără deviere prin reflexie), α este unghiul de palpare, iar X este indexul palpatorului.

În cazul unei table plane (fig. 3-57) sunt valabile aceleași formule (3-6) și (3-7); din cauza devierii parcursului pe partea inferioară a tablei, adâncimea se calculează prin relația:

$$t_1 = 2d - s \cdot \cos\alpha \tag{3-9}$$

unde d este grosimea tablei, iar t_1 este măsura în adâncime pentru o deviere prin reflexie. Dacă defectul este detectat direct, adică fără deviere prin reflexie (fig. 3-56), măsura adâncimii rezultă din formula (3-8). Formulele fundamentale de convertire (3-6) până la (3-9) sunt de regulă folosite direct de aparatele de control digitale: după stabilirea unghiului de palpare și a grosimii materialului, pe ecran este afișată sub formă de evaluare numerică măsura adâncimii corespunzătoare unui ecou. Prin acest ajutor în procesul de evaluare, controlorul se poate concentra la activitatea propriu-zisă, căutarea și descoperirea defectelor.

3.4.2.2. Stabilirea adâncimii defectului în cazul controlului unei suduri

Următoarele considerații se referă la practica de examinare a îmbinărilor sudate, dar sunt valabile pentru toate piesele de tipul tablelor. Într-o tablă sudată fără defecte, sunetele se propagă în zig-zag și nu generează pe ecran nici un ecou (fig. 3-58). Se definește *distanța de palpare* a_p ca fiind distanța proiectată în care fasciculul atinge din nou, pentru prima oară suprafața pe care a fost așezat palpatorul (fig. 3-57). Ea se calculează din relația:

$$a_p = 2d \cdot \tan\alpha \tag{3-10}$$

Pentru calibrarea distanței, în practică se utilizează, dacă nu este prevăzut altfel, o muchie în unghi drept a tablei, în care caz ecourile de la muchia inferioară apar la

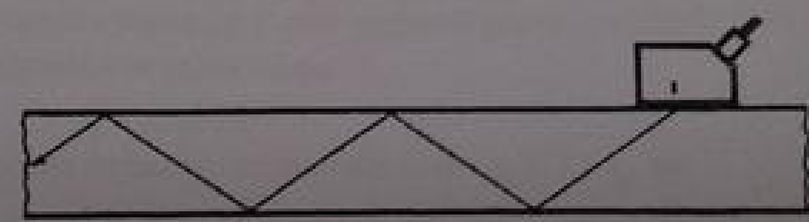
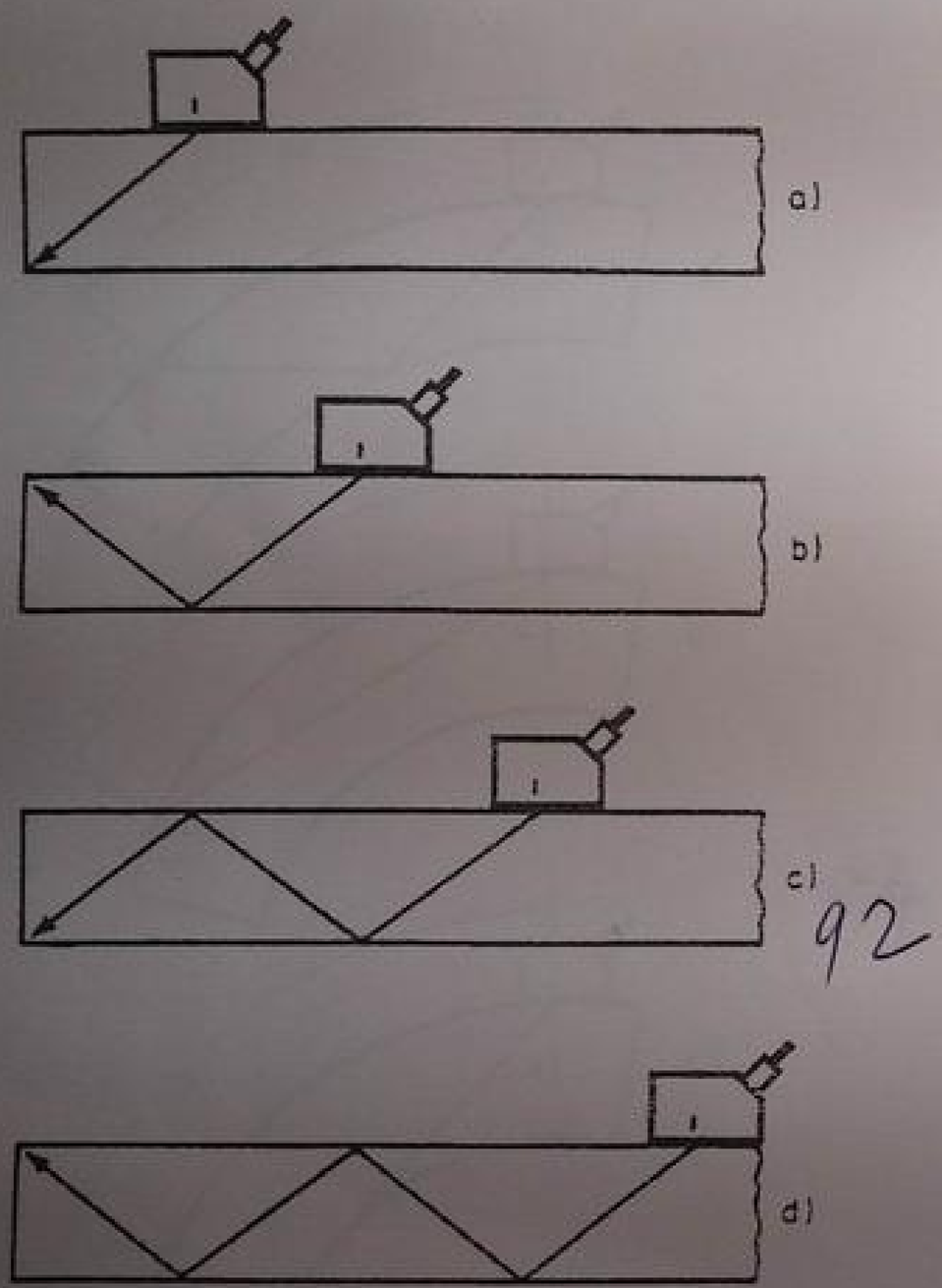


Fig. 3-58 Parcursul în zig - zag al fasciculului într-o tablă fără defect



92

Fig. 3-59 Obținerea ecourilor de la muchiile tablei:
a), c): muchia inferioară: 0,5; 1,5; 2,5; .... · a_p
b), d): muchia superioară: 1; 2; 3; .... · a_p

distanțele 0,5 a_p; 1,5a_p; 2,5a_p ș.a.m.d., iar cele de la muchia superioară la distanțele a_p; 2a_p; 3a_p; ș.a.m.d. (fig 3-59). Formarea acestor ecouri are la bază așa-zisul *efect de oglindire în unghi* și este explicată în fig. 3-60. O excepție o constituie în acest fenomen palpatoarele unghiulare de 60°, la care se întâlnește o transformare de undă la incidența pe astfel de geometrii, mult mai puternică decât în cazul altor unghiuri de palpare (vezi fig. 2-23 și 3-53), iar coordonarea ecourilor este mai dificilă. Cu astfel de palpatoare,

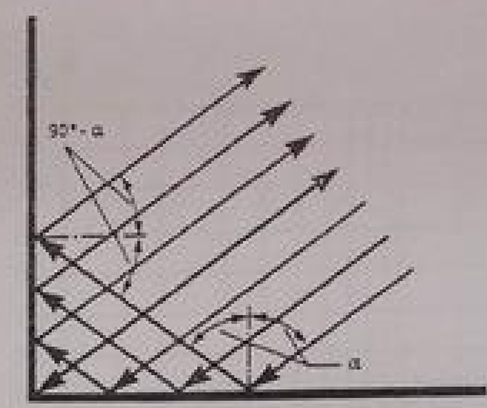


Fig. 3-60 Reflexia pe o margine de tablă (efect de margine sau efect de oglindire în unghi)

calibrarea distanței se efectuează cu ajutorul razelor sectoarelor de pe blocurile de etaloane 1 sau 2 (fig. 3-55) sau cu ajutorul unor orificii transversale conform fig. 3-103.

În cazul tablelor curbate (fig. 3-61), raza de curbură joacă un rol suplimentar. Întrucât calculul lui a_p este complicat, în practică se folosește un factor de corecție k_c, care se determină din fig. 3-62. Distanța de palpare se calculează acum din relația:

$$a_p = 2d \cdot \tan\alpha \cdot k_c \qquad (3\text{-}11)$$

De remarcat că în cazul unghiurilor mari, respectiv al grosimilor de perete mari, nu mai are loc reflexia pe peretele interior (fig. 3-61 b). Cazul limită (raza centrală a fasciculului tangentă la peretele interior) din fig 3-61c se calculează din relația:

$$\frac{d}{r} = 1 - \sin\alpha \qquad (3\text{-}12)$$

în care r este raza de curbură a tablei, respectiv a țevii. În cazul țevilor groase trebuie cercetat dacă poate fi eventual realizat un control de pe suprafața interioară (fig. 3-63) sau trebuie introduse palpatoare unghiulare speciale, cu unghi de palpare mai mic de 35° și deci cu unde longitudinale suplimentare.

Pentru a cuprinde o îmbinare sudată pe întreaga grosime, palpatorul unghiular trebuie deplasat spre și dinspre sudură între distanța de palpare și jumătatea valorii acesteia. Acesta este cazul general; excepții de la această regulă se aplică în cazul tablelor subțiri (cca 8-15 mm): deplasarea se face acum între a_p și 1,5 a_p sau între 1,5a_p și 2a_p, căci altfel este posibil ca palpatorul să lovească supraînălțarea îmbinării (fig. 3-64). În vreme ce pentru a și a' sunt valabile în continuare relațiile (3-6) și (3-7), pentru calculul adâncimii se aplică relația

$$t_2 = s \cdot \cos\alpha - 2d \qquad (3\text{-}13)$$

pentru deplasarea palpatorului între $1 \cdot a_p$ și $1{,}5 \cdot a_p$, sau

$$t_1 = 4d - s \cdot \cos\alpha \qquad (3\text{-}14)$$

pentru deplasarea între $1{,}5 \cdot a_p$ și $2 \cdot a_p$

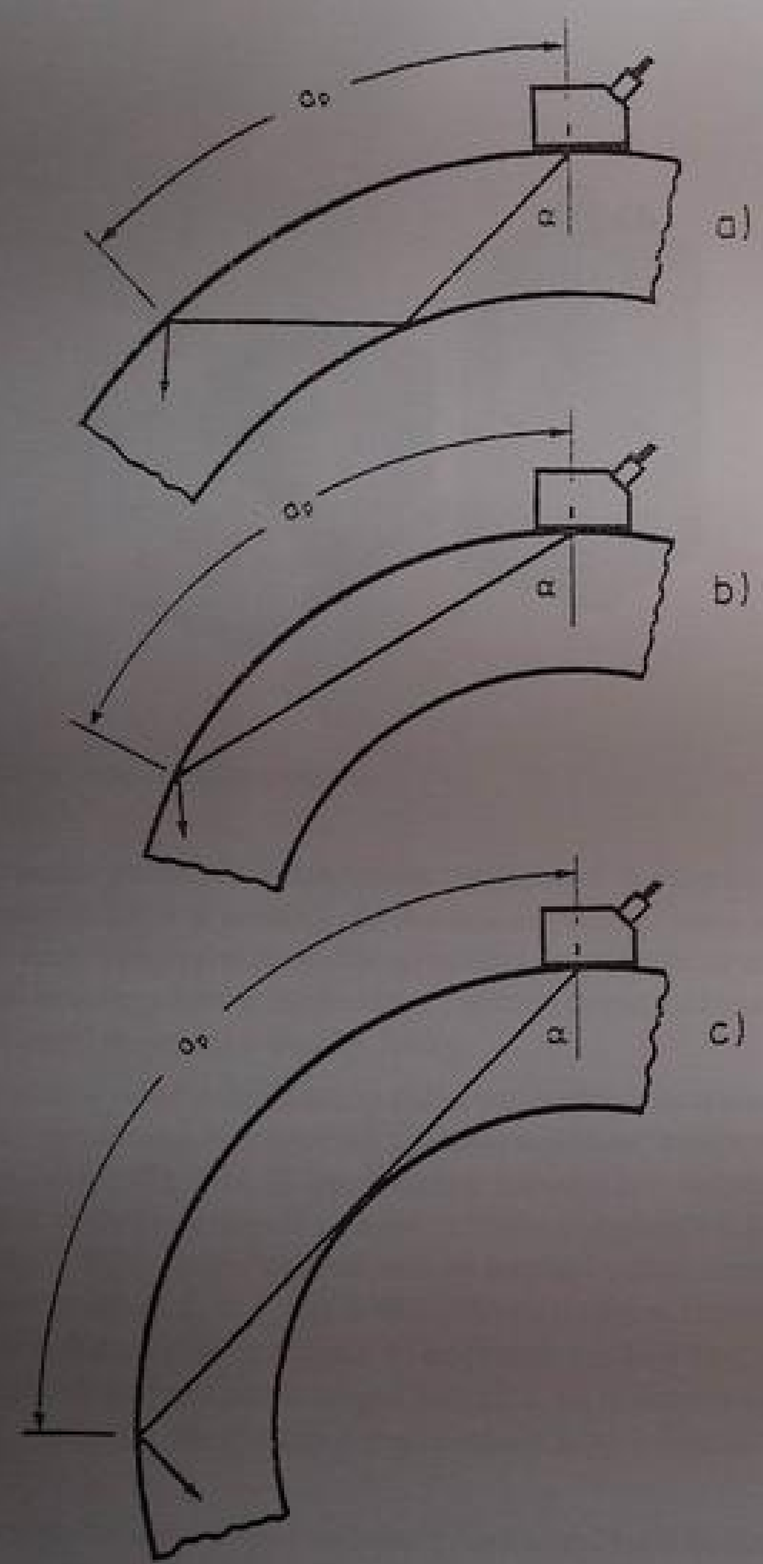


Fig. 3-61 Modificările distanței de palpare a_p în cazul tablelor curbate, în funcție de unghiul de palpare α

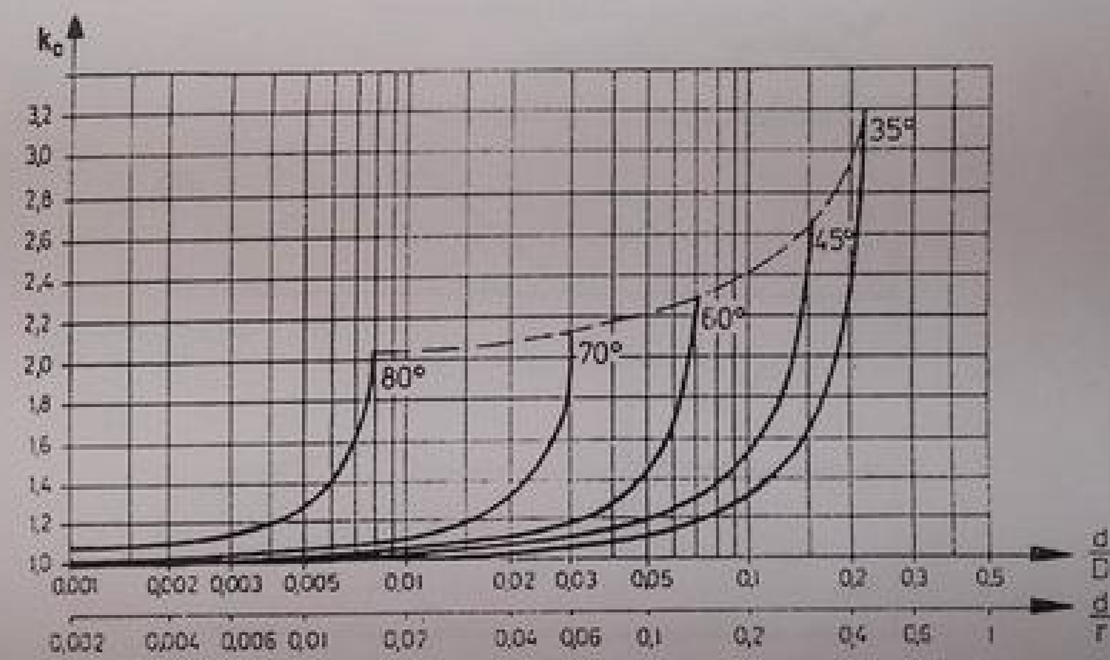


Fig. 3-62 Factorul de corecție ke pentru determinarea distanței de palpare în funcție de raporturile grosime/diametru d/D, respectiv grosime/rază de curbură d/r.

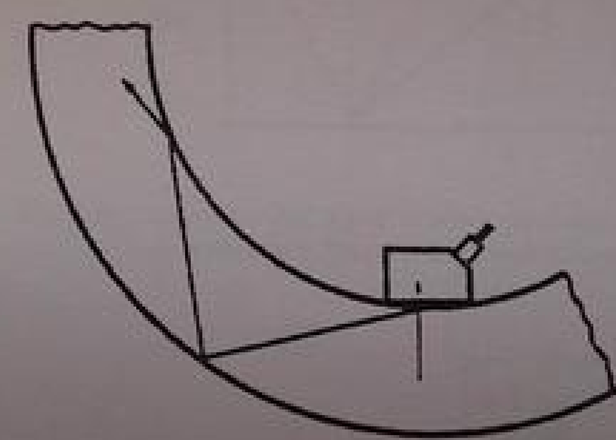


Fig. 3-63 Controlul de pe partea interioară a unei table curbate (țeavă)

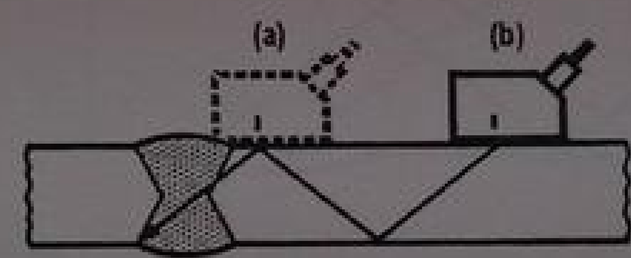


Fig. 3-64 Controlul unei îmbinări sudate la table subțire
a) lovirea îmbinării la controlul de la 0,5 a_p
b) control între a_p și 1,5 a_p

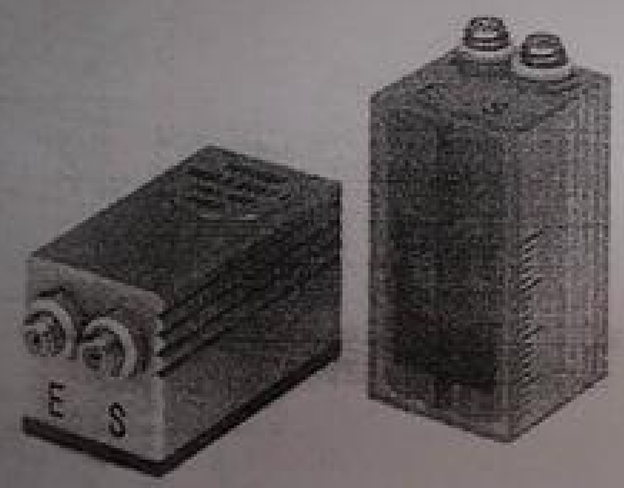


Fig. 3-65 Palpator unghiular emisie-recepție

96

În cazul pieselor groase sau a materialelor cu atenuare sonică ridicată, palparea se execută între limitele 0 și jumătate din distanța de palpare. Într-o astfel de situație, zonele din apropierea suprafeței și din apropierea palpatorului se inspectează de pe partea opusă printr-o geometrie identică sau cu ajutorul palpatoarelor unghiulare emisie-recepție cu unghi de palpare mare (fig. 3-65).

Dacă se produce o reflexie când distanța palpatorului până la axul median al îmbinării este egală cu semidistanța de palpare 0,5 a_p, atunci această reflexie provine de la partea inferioară a sudurii (fig. 3-66 c). Dacă apare o indicație la o distanță a palpatorului corespunzând distanței de palpate a_p, atunci reflectorul se găsește în partea superioară a sudurii (fig. 3-66 a). Un defect situat în zona mediană este descoperit la o distanță corespunzând valorii de 0, 75 a_p (fig. 3-66 b). Pentru un control complet al îmbinării, trebuie deci ca palpatorul să fie deplasat în orice zonă a sudurii între $a_p/2$ și a_p, înainte și înapoi, apoi să fie translatat în lungul îmbinării, cu o distanță egală cu lățimea fasciculului. Procedura este similară și pentru tablele subțiri, formând relațiile (3-13) sau (3-14).

Pentru siguranță, domeniul de palpare trebuie mărit cu cel puțin de două ori jumătatea lățimii îmbinării, încât și reflectorii situați lateral în secțiunea îmbinării să poată fi cuprinși și încadrați (fig. 3-67), ca și zonele de influență termică (fig. 3-68). Se recomandă ca palpatorul să fie îndreptat nu numai perpendicular pe direcția îmbinării,

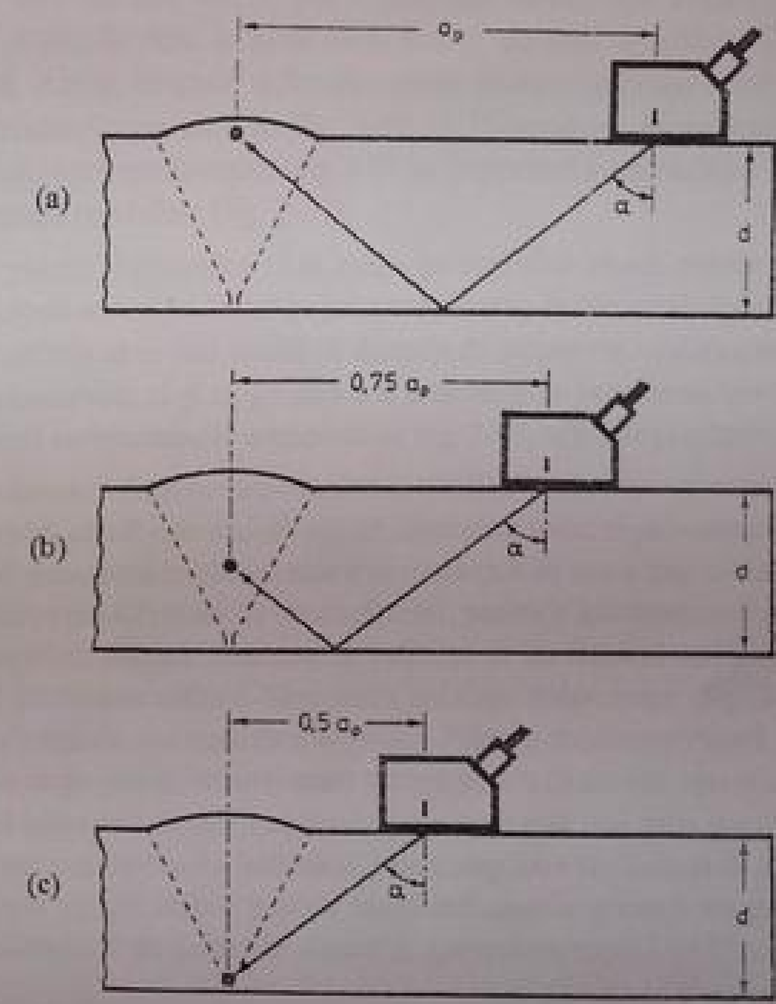


Fig. 3-66 Detectarea unui defect: în partea superioară de la distanța de palpare, a_p (a); în partea mediană de la distanța 0,75 a_p (b); în partea inferioară de la distanța 0,5 a_p (c)

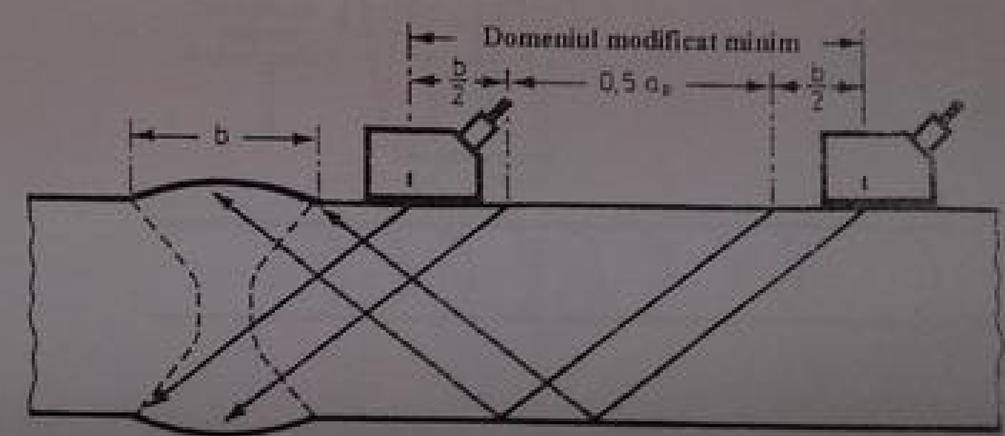


Fig. 3-67 Domeniul modificat de palpare în cazul unei îmbinări în dublu V (înainte îmbinare în X)

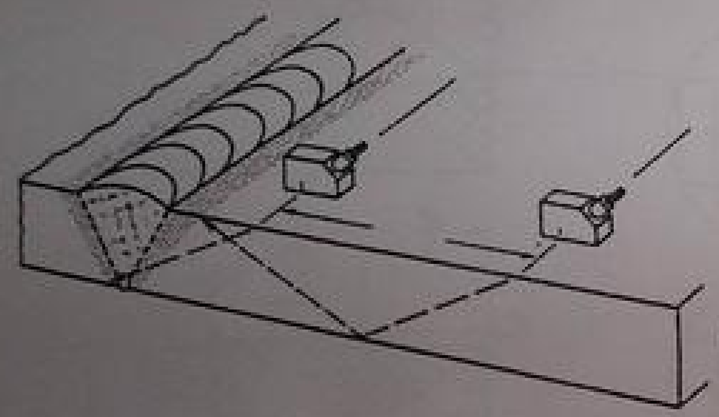


Fig. 3-68 Domeniul maxim modificat la o îmbinare în V când trebuie cuprinse și zonele influențate termic

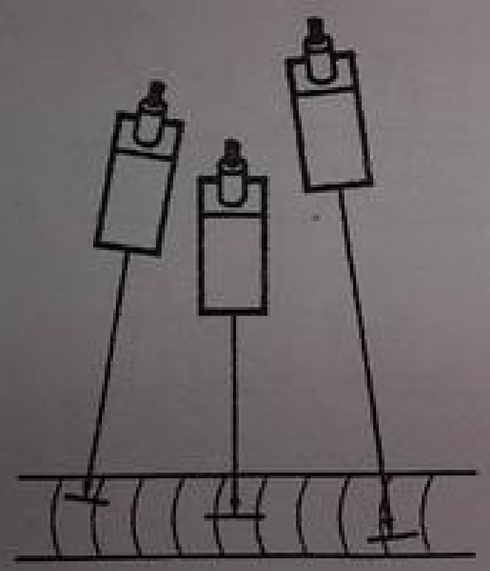


Fig. 3-69 Mișcare de pendulare a palpatorului pentru detectarea optimă a unui defect plan

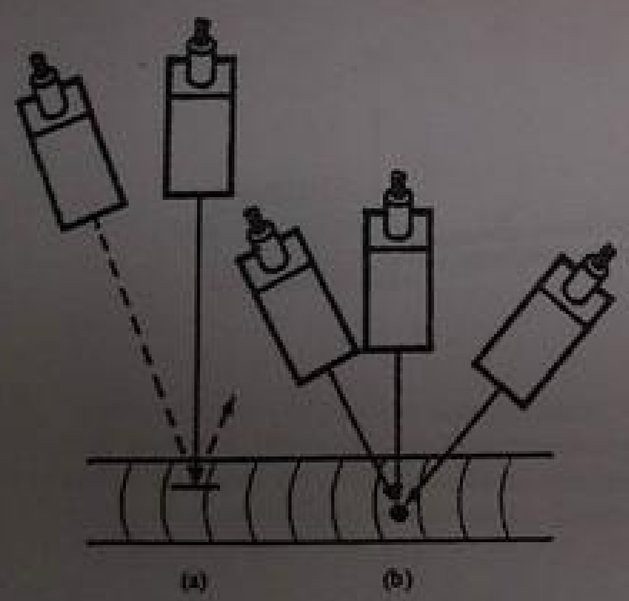


Fig. 3-70 Pendularea palpatorului pentru a face deosebirea între
a) defecte plane
b) defecte volumice

ci și ușor înclinat. Astfel pot fi mai bine descoperite defectele cu orientare oblică (fig. 3-69). În plus, în acest mod, se pot deosebi defectele volumice de cele de tip fisură. Astfel, în cazul defectelor plane apare o indicație doar când fasciculul cade perpendicular pe acestea (fig. 3-70 a). Dimpotrivă, la defectele volumice se obțin indicații din toate direcțiile (fig. 3-70 b). În practică s-a dovedit corespunzătoare palparea cu ușoară pendulare (fig. 3-71).

Este practic și avantajos să se indice pe suprafața piesei zonele pe care se deplasează palpatorul sau să se fixeze pe palpator sisteme ajutătoare de localizare (fig. 3-72) [38]. Aici trebuie să se țină seamă că distanța de palpare se modifică nu numai cu unghiul a al palpatorului, ci și cu grosimea d a tablei și cu raza de curbură r a piesei. Fig. 3-73 prezintă comparativ, în completarea fig. 3-61, efectele precizate mai sus.

Localizarea defectelor este cu atât mai dificilă, cu cât este mai mică grosimea materialului controlat, cu cât este mai divergent fasciculul sonic al palpatorului folosit (fig. 3-74) și cu cât geometria îmbinării este mai depărtată de cea a unei table. De aceea poate fi de înțeles ca după detectarea unui reflector, pentru o localizare mai exactă, să se aleagă un alt unghi de palpare și/sau un alt palpator cu un fascicul mai îngust. Pentru a clarifica dacă geometria sudurii furnizează indicații îndoielnice (fig. 3-75) trebuie polizate supraînălțările sau arsurile marginale. Printr-o localizare exactă se poate alege corect partea de pe care trebuie reparată sudura pentru ca această operație să fie cât mai redusă. Acest lucru este cu atât mai important, cu cât este mai mare grosimea îmbinării. Luând ca reper axa mediană a îmbinării, prin comparare cu distanța de palpare și cu jumătatea acesteia se pot stabili practic toate influențele geometrice și defectele de formă, deosebindu-le de defectele situate în apropierea suprafeței (fig. 3-75).

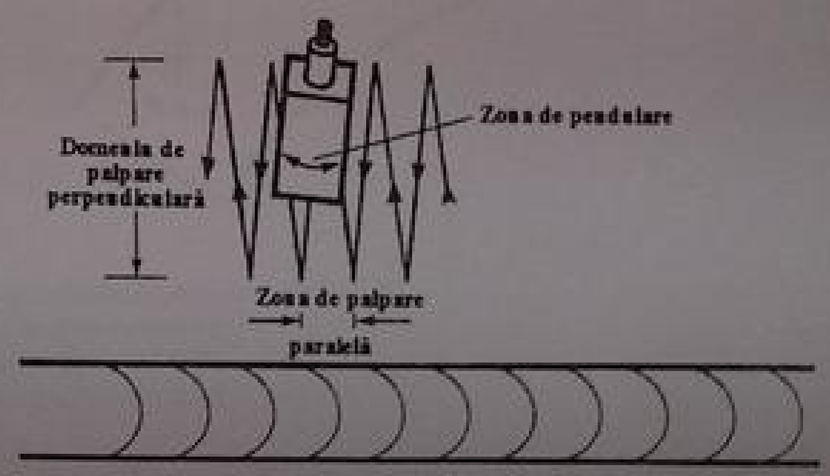
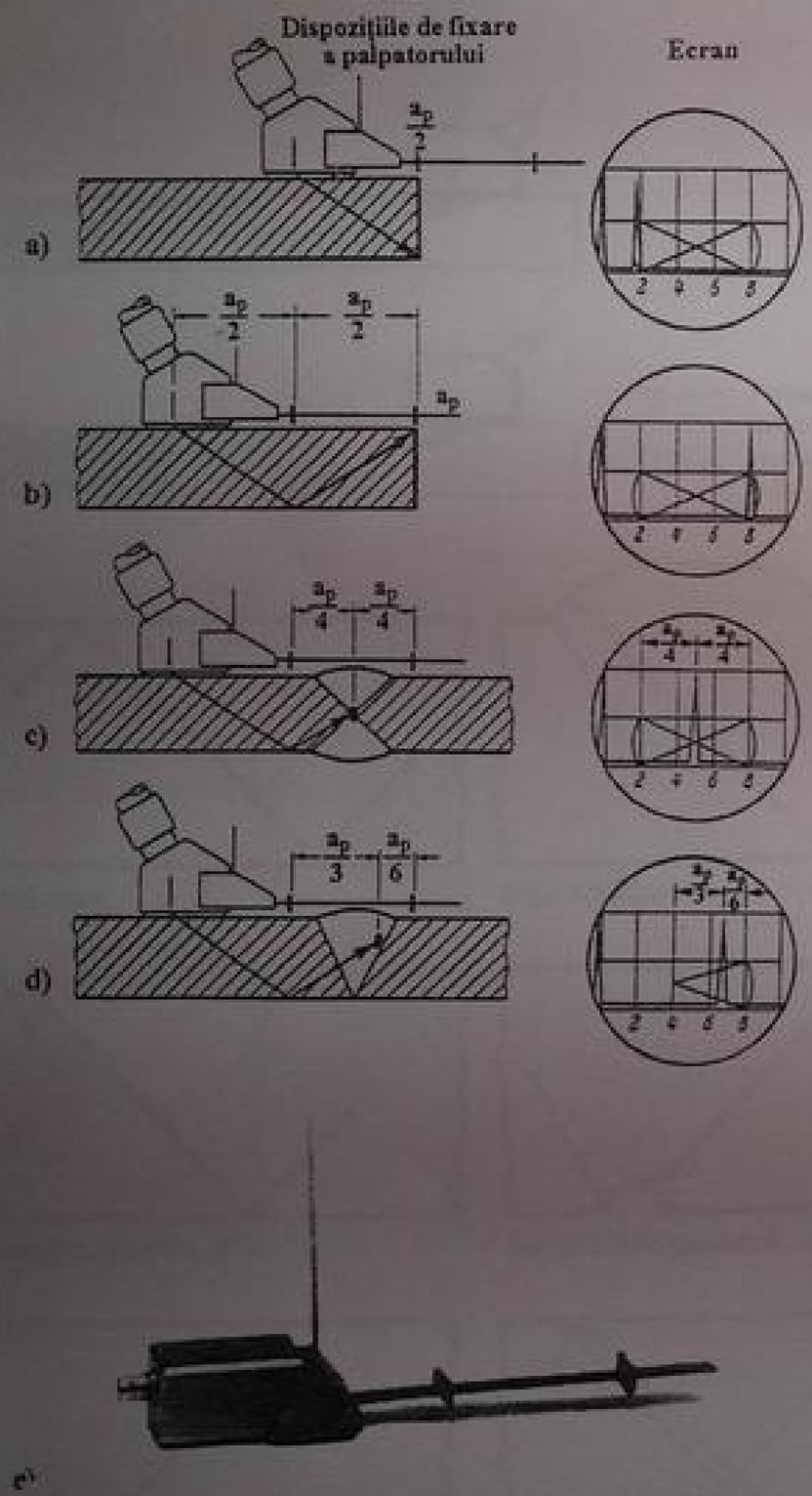


Fig. 3-71 Mișcarea completă a palpatorului pentru controlul total al îmbinării sudate: deplasare perpendiculare: vezi fig. 3-67 și 3-68; deplasare paralelă: cca jumătate până la lățimea oscilatorului; zona de pendulare: vezi fig. 3-69 și 3-70



100

Fig. 3-72 Palpator unghiular cu riglă de localizare reglabilă [38]:
a),b): calibrare la jumătate și la întreaga distanță de palpare
c),d): exemple de localizare a defectelor în cazul îmbinărilor în dublu V și în V
e) realizare practică a riglei de localizare cu călărcți reglabili

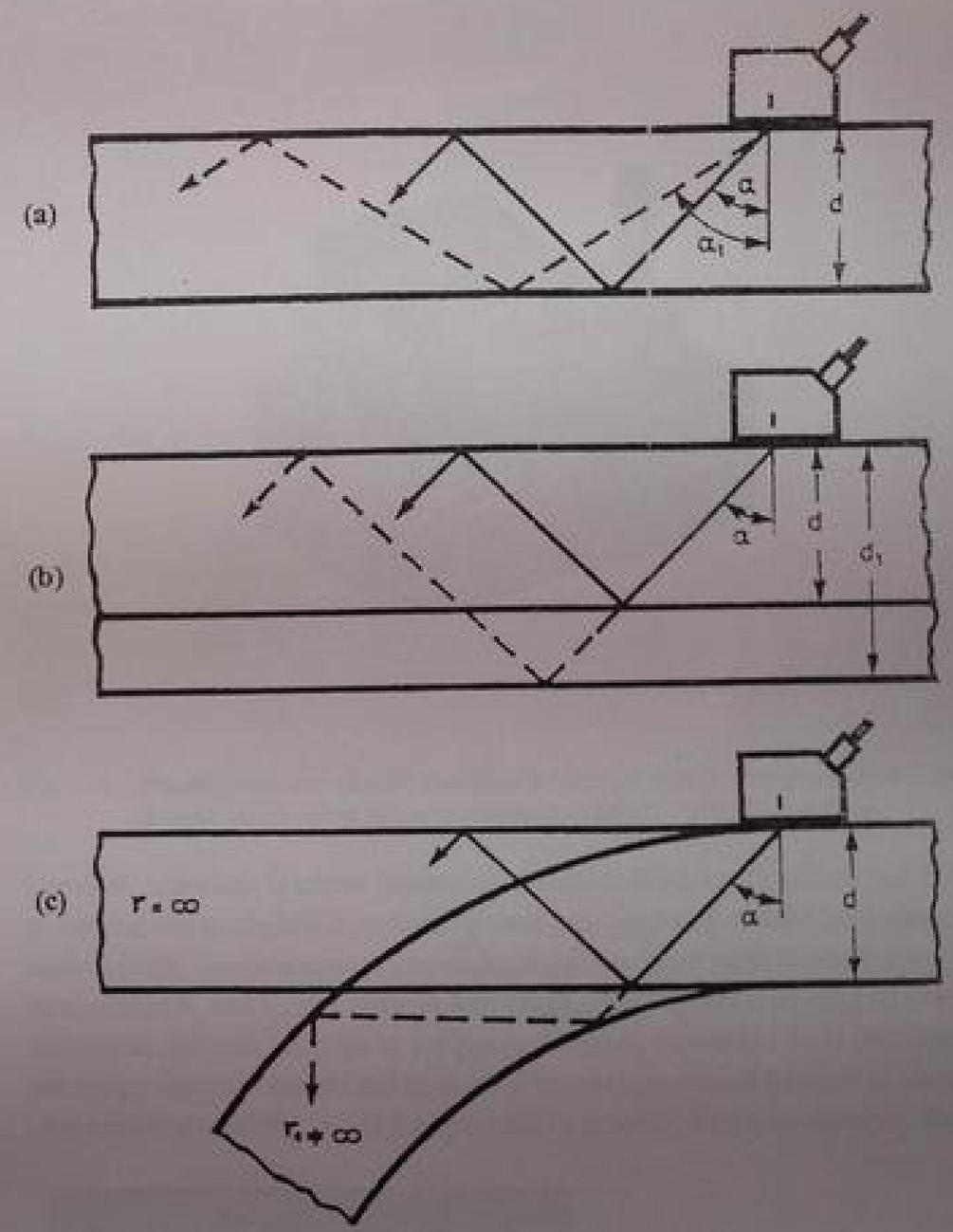


Fig. 3-73 Dependența distanței de palpare a_p de:
a) unghiul de palpare α
b) grosimea tablei d
c) raza de curbură r, r_1

Orice palpator unghiular suferă în mod obligatoriu o uzură datorită frecării pe suprafețele adesea rugoase ale piesei. Palpatorul poate fi protejat prin folosirea unor piese suplimentare detașabile, care pot fi în plus și adaptate la curbura suprafeței (fig. 3-76). Avantajul principal constă în faptul că un singur palpator poate fi folosit la orice

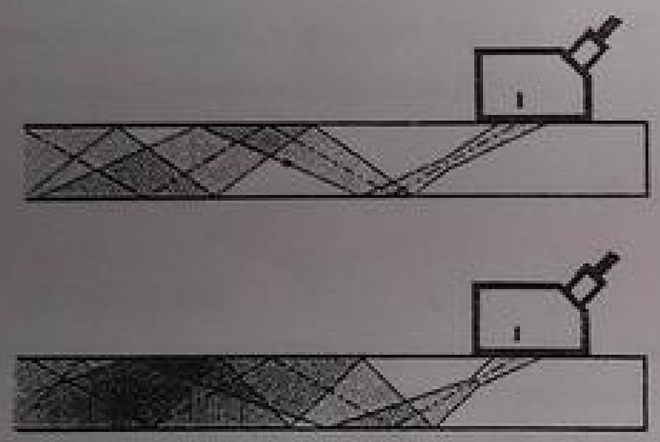


Fig. 3-74 Propagarea fasciculului în cazul unei deschideri unghiulare reduse (sus) și reduse (jos)

102

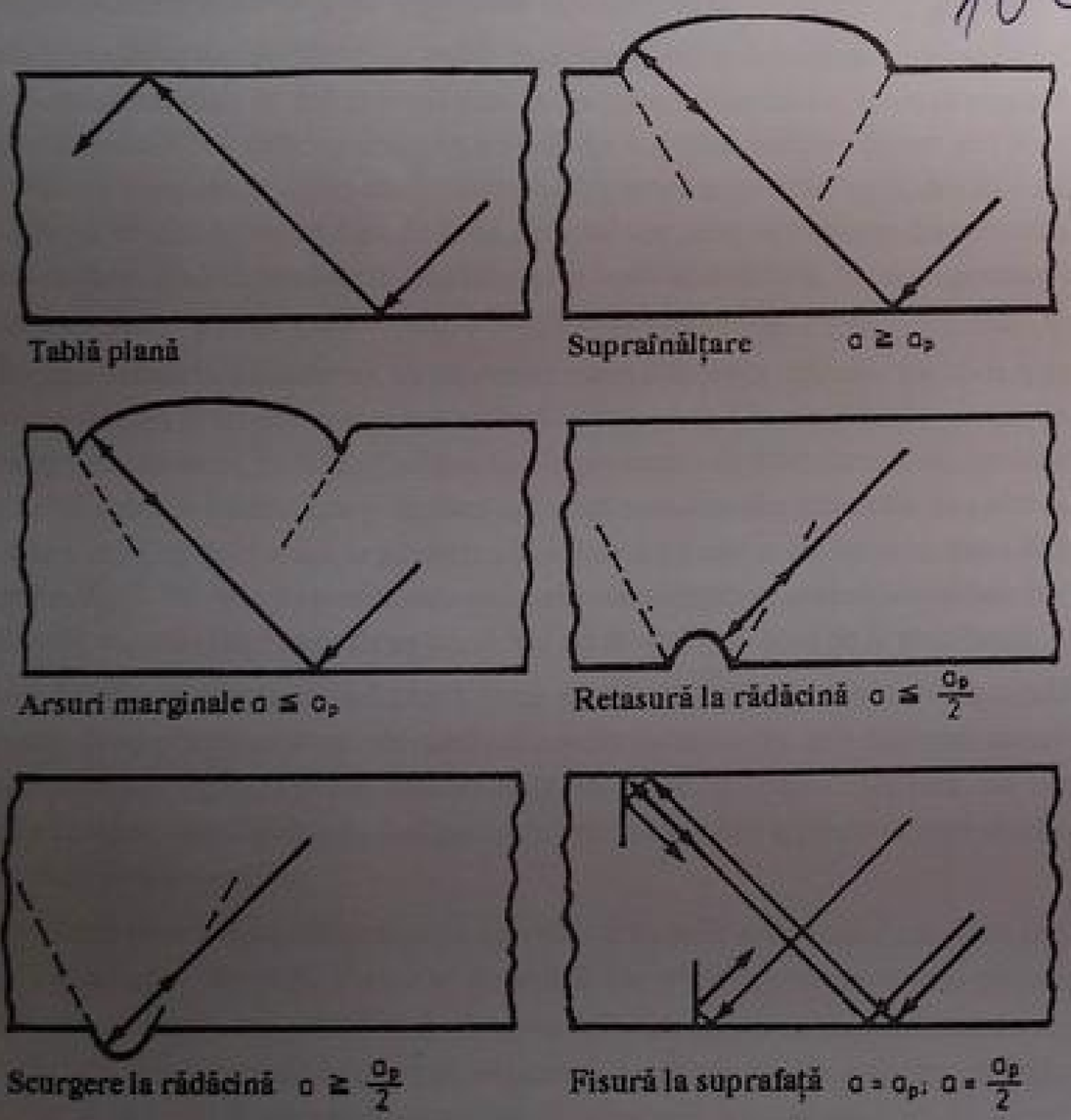


Fig. 3-75 Posibilități de evaluare a geometriei îmbinării sudate și a defectelor din apropierea suprafețelor

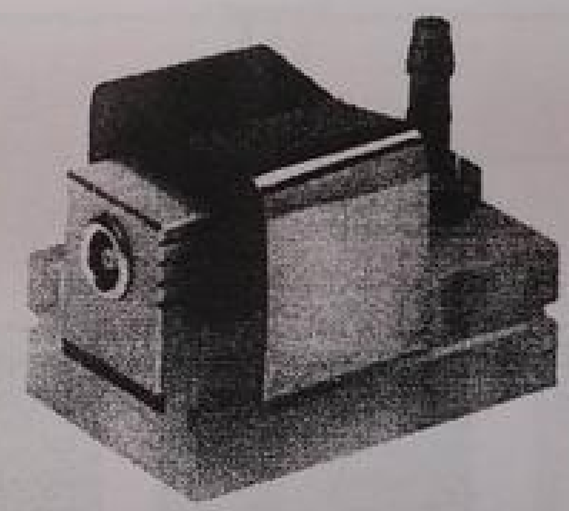


Fig. 3-76 Plapator unghiular cu lamă elastică de prindere și talpă de plexiglas (neprelucrată); în partea dreaptă racord pentru furtun în vederea introducerii mediului de cuplare

formă de suprafață. Înaintea fiecărei examinări trebuie verificat dacă punctul de ieșire al fasciculului și unghiul de palpare și deci prin acestea și distanța de palpare au rămas nemodificate. Verificarea se poate realiza cu ajutorul unei piese de probă sau al blocurilor de etalonare K_1 sau K_2 sau, cum s-a arătat deja, prin palparea unei margini a materialului. Indicațiile *cultivate* cu grijă la înălțimea maximă, provenind de la cele două muchii, descriu grosimea îmbinării sudate și pot fi marcate pe ecranul tubului catodic cu ajutorul unui creion special (fig. 3-77). La aparatele cu monitor, domeniul corespunzând grosimii

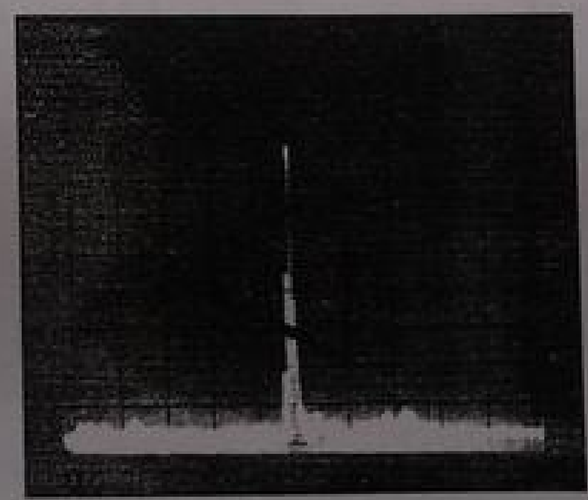


Fig. 3-77 Simbolul îmbinării sudate (sudură în V) în fața ecranului defectoscopului

îmbinării poate fi marcat simplu prin conectarea diafragmei monitorului. Excepție fac, după cum s-a amintit, palpatoarele unghiulare de 60°.

Informații suplimentare se găsesc în [39,40].

3.4.3 Calibrarea sensibilității și descrierea defectelor

3.4.3.1 Generalități

Defectele a căror extindere este mai mare decât cea a câmpului sonic se pot descrie relativ simplu. Prin palparea continuă a unei foi de tablă laminată se pot determina ușor dimensiunile unei stratificări interne cu extindere mare, iar prin marcare pe suprafața tablei, defectul poate fi prezentat ca o imagine C. 104

Marginea defectului se determină astfel: dacă palpatorul se deplasează spre exteriorul defectului, indicația de defect scade când o fracțiune a fasciculului sonic se propagă prin materialul fără defect și apare un ecou de fund, a cărui înălțime devine mai mare decât cea a ecoului de defect când palpatorul depășește zona stratificării. Acolo unde scăderea ecoului de defect este de 6 dB, defectul este atins de jumătate din secțiunea fasciculului, cealaltă jumătate propagându-se în materialul sănătos. În acest caz centrul oscilatorului se găsește exact deasupra marginii defectului (fig. 3-78).

În cazul defectelor neuniforme, cu rugozitate mare, dispuse la adâncimi variabile, este mai avantajos să fie observat ecoul de fund.. Dacă centrul fasciculului se găsește pe marginea defectului, jumătate din fascicul atinge peretele de fund, iar cealaltă jumătate este reflectată în diferite direcții de către suprafața neuniformă a defectului. În astfel de cazuri, ecoul de fund scade la jumătate din valoarea pe care o are într-o secțiune fără defect (fig. 3-79). Această metodă este mai puțin adecvată pentru controlul stratificărilor, întrucât ecoul de fund coincide ca poziție cu cel de al doilea ecou de la stratificare.

Mai dificilă este aprecierea reflectorilor mai mici decât fasciculul sonic. Prima regulă înainte de aprecierea acestora este stabilirea maximului indicației, prin deplasare ușoară a palpatorului. Operația poartă denumirea de "cultivarea indicației". De abia apoi are sens folosirea posibilităților de evaluare a mărimii. Înainte de a le prezenta, sunt absolut necesare câteva precizări.

La reflexia impulsurilor ultrasonice pe suprafața defectelor sunt valabile aceleași legi ca în cazul oglinzilor plane sau curbe din optică. Un reflector plan produce la palpare normală o indicație mai puternică decât un alt reflector curbat unidimensional, de ex. un orificiu cilindric, când este palpat perpendicular pe axa sa. Un reflector multiplu curbat, de ex. unul sferic, oferă o suprafață de reflexie încă și mai mică.

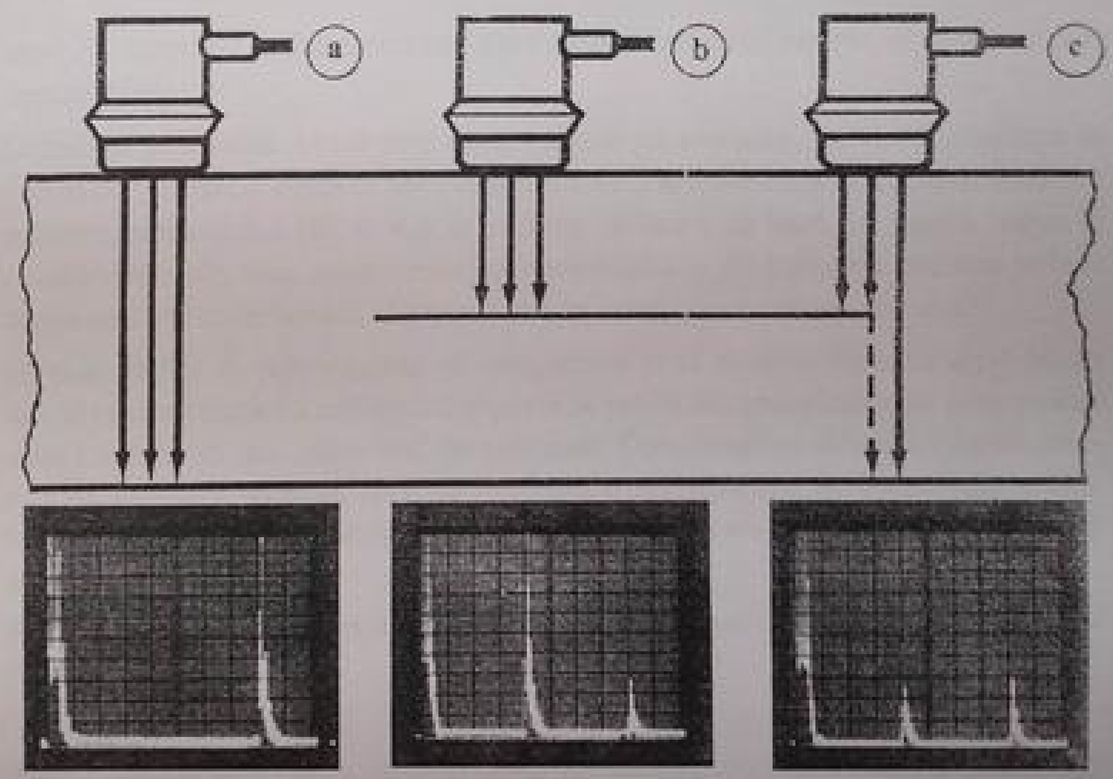


Fig. 3-78 Palparea marginilor urmărind evoluția ecoului de defect; a) fără defect, b) stratificare, c) marginea stratificării

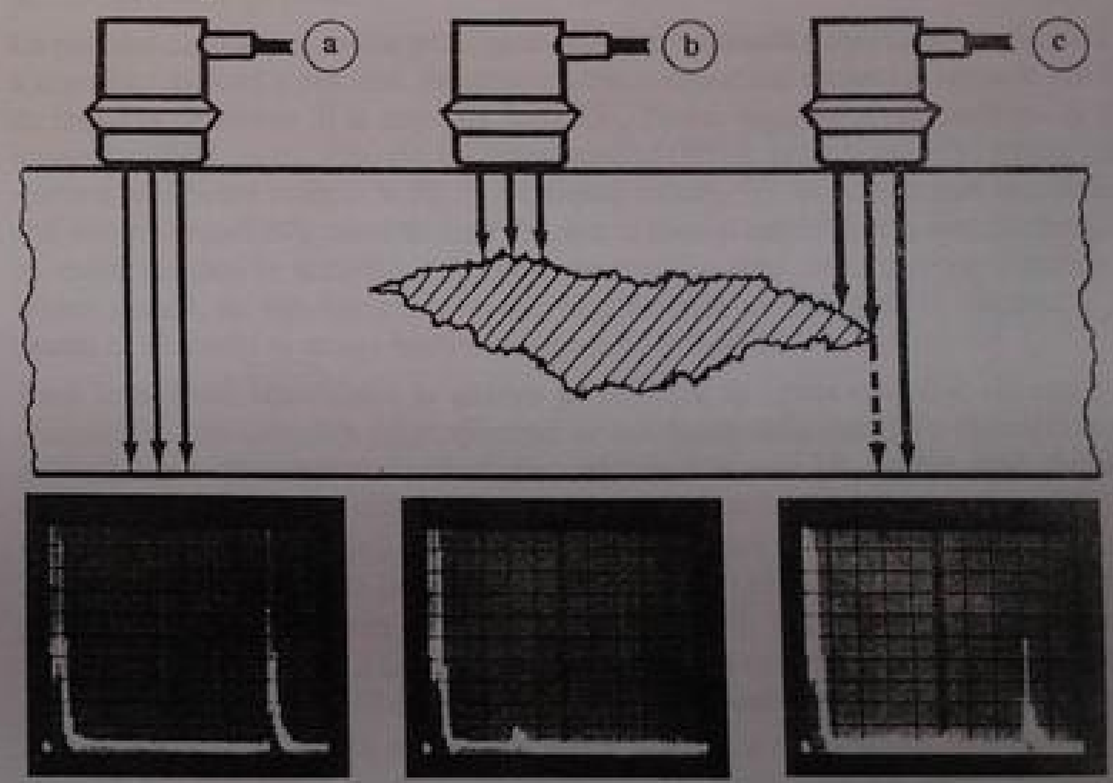


Fig. 3-79 Palparea marginilor urmărind ecoul de fund; a) fără defect, b) defect cu suprafața puternic neregulată, c) marginea defectului

Probabilitatea de detectare dependentă de direcție are o comportare inversă. În vreme ce un defect plan poate fi optim detectat printr-o tehnică simplă de control doar din două direcții , perpendiculare pe suprafața defectului (fig. 3-70 a), un reflector cilindric poate fi detectat din orice direcție radială (fig. 3-70 b). Defectele de formă sferică pot fi descoperite din toate direcțiile. La fiecare din acești reflectori, indicația crește o dată cu mărimea defectului, dar la fiecare tip în mod diferit. De aceea este dificilă compararea răspunsurilor.

Mărimea indicației este dependentă și de rugozitatea suprafeței, respectiv de raportul dintre *adâncimea asperităților* și lungimile de undă (așa-numita *pierdere de transfer*, fig 3-80), de caracteristicile palpatorului (frecvența și diametrul oscilatorului), de parcursul sonic în piesă și de proprietățile acustice ale materialului străbătut, ca și de puterea de emisie și sensibilitatea aparatului ultrasonic.

Practica controlului pretinde totuși o decizie despre ce poate fi acceptat și ce trebuie reparat, ca și despre modul în care valorile limită pot fi reproductibil determinate. Această problemă se poate rezolva în două moduri: o dată prin compararea cu așa-zisele "*defecte echivalente*" concepute teoretic, dar calculabile (*metoda AVG*) și a doua oară, prin compararea reflexiilor de la defectele naturale cu cele ale *reflectorilor de referință* practicați artificiali (defecte de probă). În nici

106

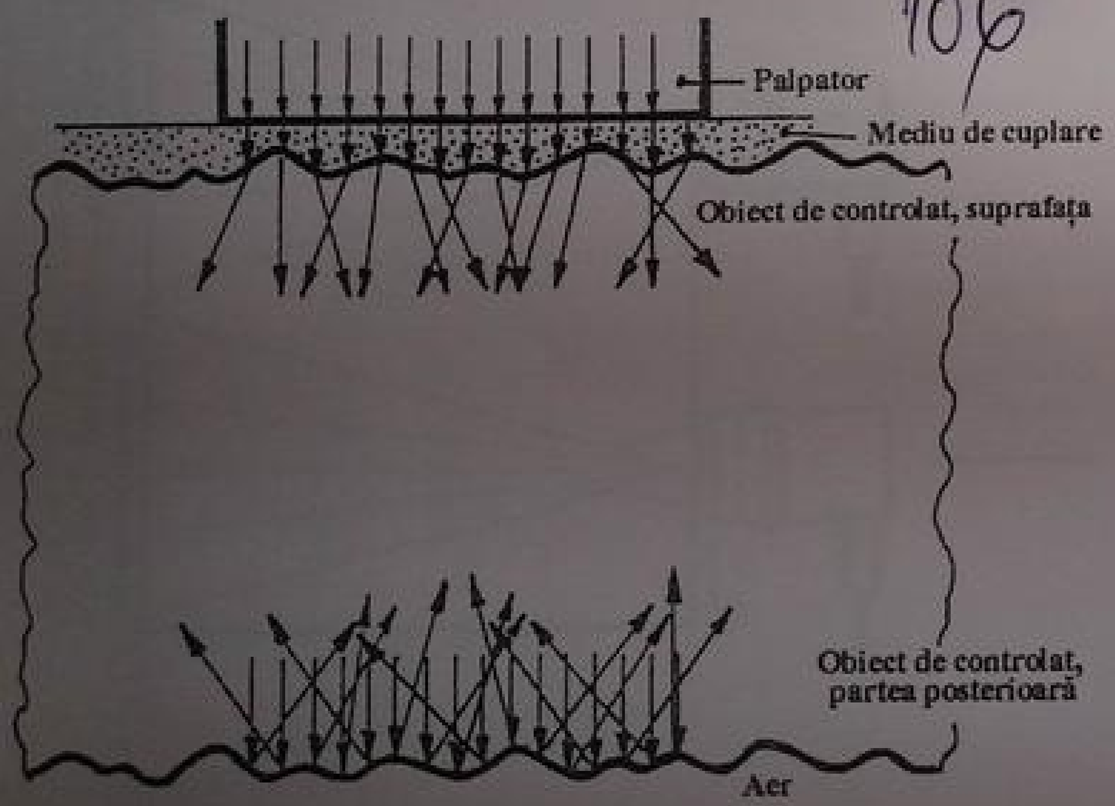


Fig. 3-80 Apariția pierderii de transfer prin refracție și împrăștiere

unul din cazuri nu se determină mărimea reală a defectului natural, ci doar o valoare comparativă.

Diferența principală dintre cele două metode de evaluare, ce vor fi analizate în continuare, constă în aceea că pentru sistemul AVG se apelează la blocurile de etalonare normate internațional (K_1 și K_2) în vederea calibrării de bază, iar pentru luarea în considerare a efectelor caracteristicilor materialului și ale suprafeței acestuia trebuie depus un efort considerabil, efort care lasă în urmă o oarecare nesiguranță.

Metoda liniilor de referință sau *de comparație* evită incertitudinile de acest fel. În cadrul ei sunt practicate orificii într-o piesă de probă din același material și cu aceeași stare a suprafeței ca și materialul de examinat. Corespunzător diferitelor cazuri practice de utilizare, această metodă necesită o multitudune de corpuri de probă. Incertitudinile și toleranțele de măsurare rămân limitate doar la eroarea de poziționare a orificiilor.

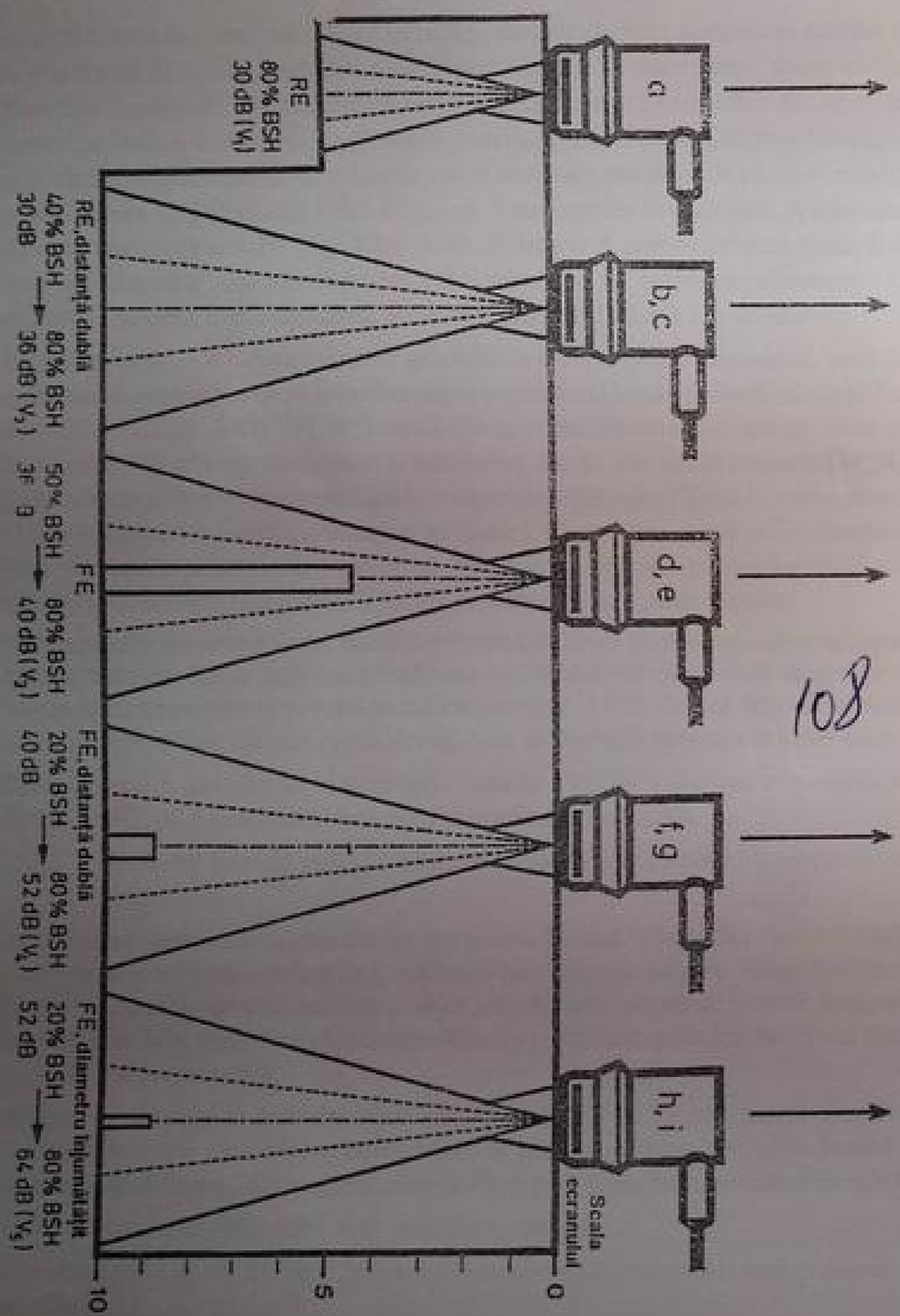
Referitor la acest paragraf există numeroase articole de specialitate: între altele se găsesc [40-52].

3.4.3.2 Calibrarea AVG cu ajutorul ecourilor de fund

Pentru aplicarea modelului care se găsește la baza *metodei AVG*, în fig. 3-81 este prezentată o serie de probe.

Un palpator normal este cuplat pe un bloc de oțel și realizează palparea perpendiculară a suprafeței de fund a blocului. Pe tubul catolic al aparatului ultrasonic apare în afară de impulsul de emisie SI și ecoul de fund RE_1. Pentru reglarea acestei indicații la o înălțime vizibilă, de ex. 80% din înălțimea ecoului (BSH), amplificatorul se aduce, cu ajutorul unui buton calibrat în dB, la o anumită valoare, V_1. În zona în care blocul de oțel are grosimea dublă, ecoul de fund RE_2 are, la aceeași amplificare și considerând că nu există pierderi în material, o înălțime de doar jumătate din cea corespunzătoare primei situații, iar amplificarea ar trebui suplimentată cu 6dB până la valoarea V_2, pentru ca semnalul să atingă înălțimea inițială de 80%BSH.

Dacă în mijlocul fasciculului se găsește un reflector de forma unui disc circular cu diametrul G_1, cu suprafața perpendiculară pe axa fasciculului, rezultă o indicație la o distanță A corespunzător mai redusă, cu o înălțime a ecoului FE_1 care în mod normal nu atinge valoarea de 80%BSH. Prin mărirea amplificării la V_3 se poate aduce FE_1 la înălțimea aceasta de referință. Dacă se dublează distanța A până la reflectorul tip disc, atunci amplificarea trebuie mărită cu 12dB, adică prin factorul 4, până la valoarea V_4, pentru a se atinge înălțimea de referință de 80% BSH. Dacă se reduce la jumătate diametrul reflectorului (0,5 G_1), suprafața reflectantă se va reduce la un sfert. Înălțimea ecoului scade din nou cu 12 dB (factorul 4), iar amplificarea trebuie mărită cu aceeași valoare până la V_5 pentru a se putea atinge înălțimea de referință. Diagrama din fig. 3-81 prezintă aceste raporturi. Relațiile dintre *distanțele A*, *amplificările V* și *mărimea reflectorilor G* sunt cuprinse în aceste *diagrame AVG*.



108

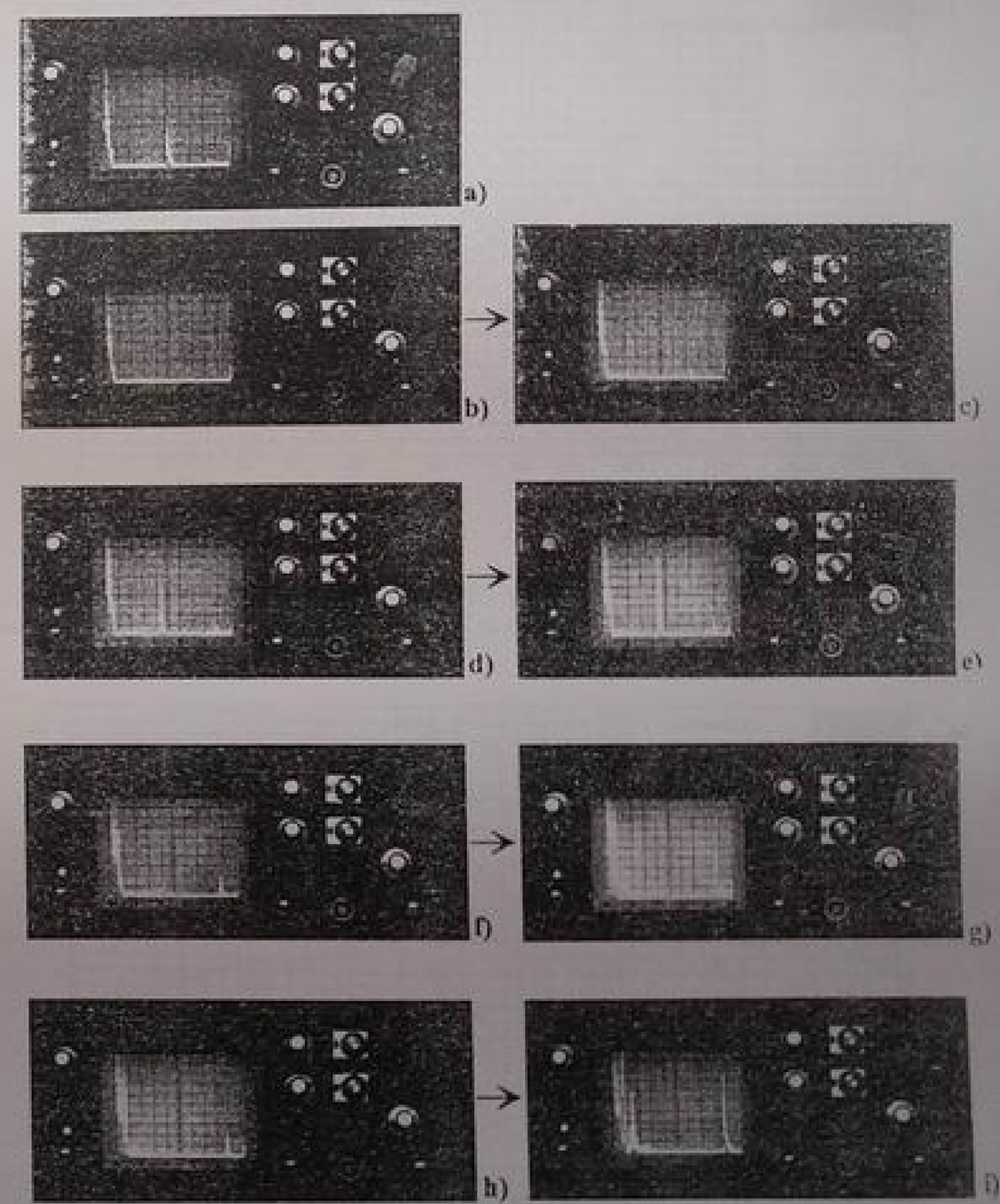


Fig. 3-81 Model de metoda AVG de evaluare; alte explicații în text

În cazul diametrelor mai mari ale reflectorilor, curbele aferente acestora se apropie și se transformă în curba ecoului de fund. Acest fapt are loc atunci când discul atinge diametrul fasciculului sonic. Setul de curbe rezultă din suma unor astfel de cazuri de control la variația distanțelor, amplificării și mărimii reflectorilor. Cât timp distanța A și mărimea reflectorului G sunt date în valori numerice absolute, de ex. mm, rezultă pentru fiecare tip de palpator o altă diagramă. Toate acestea se contopesc în diagrama AVG universală (normată) (fig. 3-83), unde distanțele A sunt definite ca multipli ai lungimii câmpului apropiat al palpatorului respectiv, iar mărimea reflectorului G reprezintă raportul dintre diametrul acestuia și diametrul efectiv al oscilatorului.

Înlocuind în fig. 3-81 discul circular printr-un orificiu cilindric transversal, setul de curbe trasate perpendicular pe suprafața piesei prezintă altă înclinație decât cele specifice curbelor AVG (fig. 3-84)[53]. Reflectorii sferici prezintă relații similare cu cei de tip disc circular în privința distanțelor și mărimilor, dar cu alte valori absolute [44,54]. Toate curbele diferit înclinate prezintă în câmpul depărtat o alură liniară, numai pentru că axa distanțelor A este logaritmică și nu liniară. Cu toate că se pot defini diagrame AVG universale pentru toate formele de reflectori, în practica controlului ultrasonic este folosită exclusiv metoda AVG bazată pe reflectori de tip disc circular.

Mărimea unui reflector natural stabilită prin metoda AVG nu corespunde cu mărimea reală a acestuia. Chiar la o mică înclinare a planului defectului față de incidența fasciculului, amplitudinea ecoului se reduce (vezi par. 3.4.1). Este de aceea de dorit ca defectul să fie palpat din mai multe direcții și să se evalueze indicația cea mai mare.

Dacă măsurarea unui defect natural prin metoda AVG dă o mărime echivalentă de defect (EFG) de 5 mm, atunci este corectă următoarea afirmație:

> Defectul este cel puțin la fel de mare ca un disc circular cu diametrul de 5 mm.

110

Incertitudinea tehnică de control devine mai redusă în cazul reflectorilor sferici. Rezultă mereu aceeași înălțime a indicațiilor, indiferent de direcția de palpare. Totuși detectarea acestui tip de reflector este posibilă doar cu sensibilitate ridicată de control. Independent de acest fapt, reflectorii sferici ca defecte de probă sunt greu realizabili sau chiar imposibil de confecționat.

Avantajul principal al metodei AVG constă în faptul că se pot realiza descrieri reproductibile ale rezultatelor controlului. În general, pentru porțiunea liniară a diagramei AVG (cca dublul lungimii câmpului apropiat) se pot folosi următoarele relații:

scăderea ecoului de fund, RE: 6dB la dublarea distanței

scăderea ecoului de defect, FE: 12dB la dublarea distanței (raportată la același diametru de reflector)

scăderea ecoului de defect, FE: 12dB la înjumătățirea diametrului (corespunde unui sfert de arie, raportat la aceeași distanță)

În fig. 3-83 aceste relații se pot verifica cu ușurință.

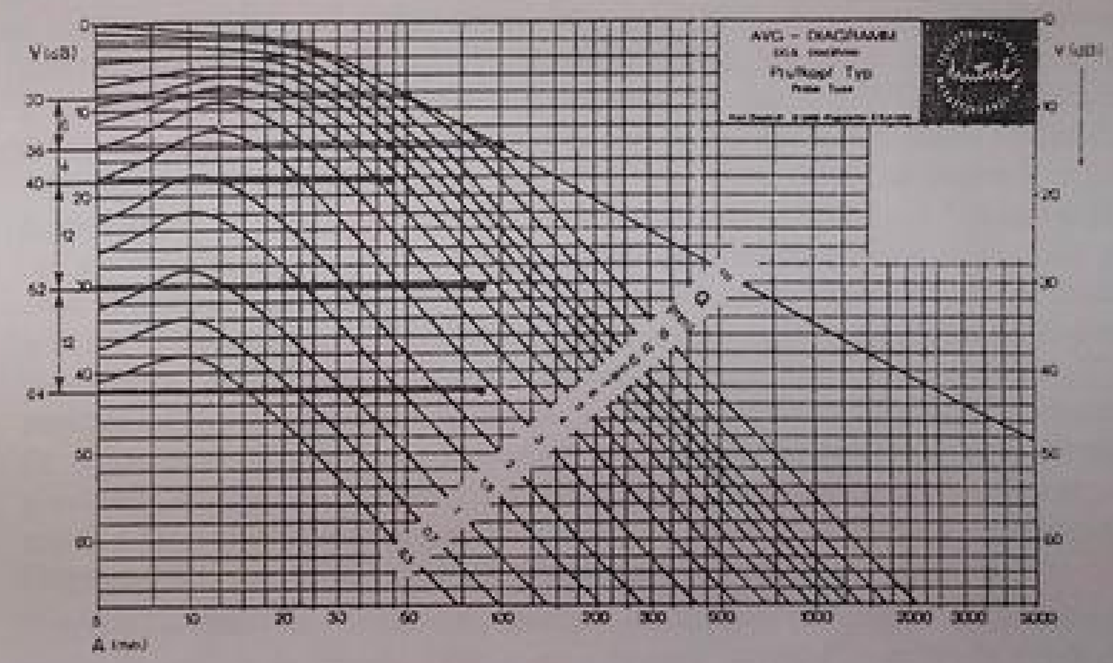


Fig. 3-82 Diagrama AVG ca model pentru fig. 3.81, reflectorul mare corespunde unui KSR de cca 5,4 mm diametru, defectul mic corespunde unui KSR de cca 2,7 mm diametru

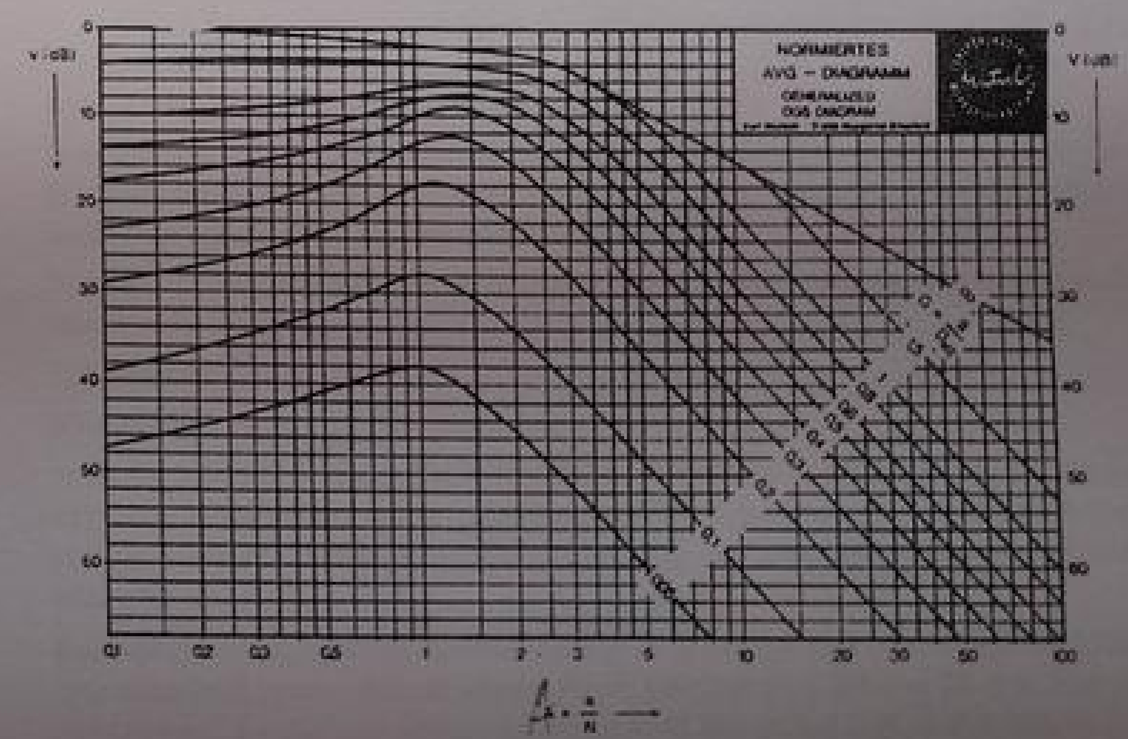


Fig. 3-83 Diagrama AVG normată

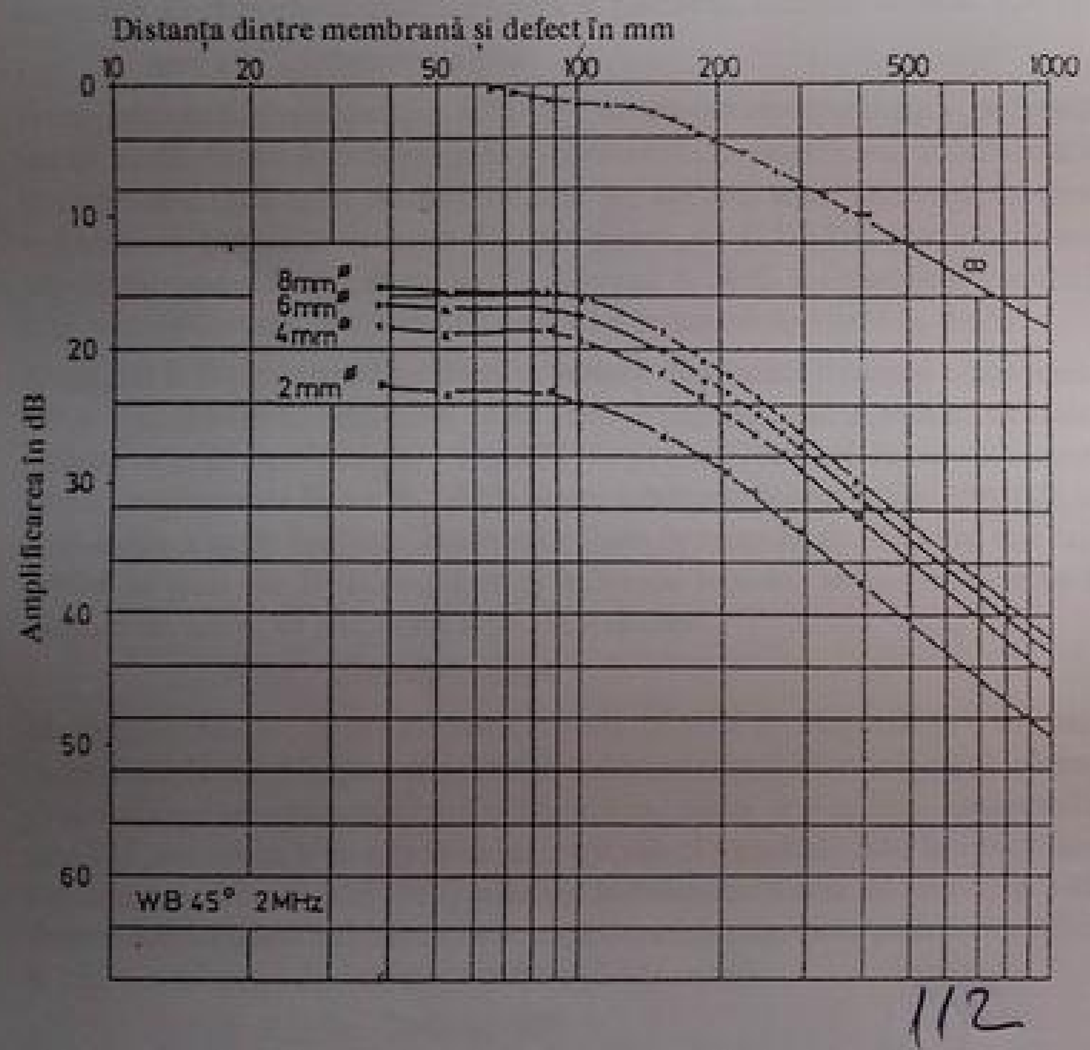


Fig. 3-84 Exemplu de diagramă AVG măsurată, pentru orificii cilindrice în oțel (măsurată cu palpator unghiular [53]

Metoda AVG a fost inventată în Germania și a fost cu preponderență aplicată acolo unde s-au utilizat aparate ultrasonice de provenienţă germană. Fabricanții germani de aparate au dezvoltat în acest scop și accesorii practice. Există pentru toate palpatoarele diagrame AVG și scale mobile în care sunt luate în considerare datele reale ale palpatoarelor. Scalele mobile AVG sunt aplicate în fața ecranului defectoscopului. Înălțimile ecourilor pot fi observate prin scală, iar EFG poate fi citită direct pe curbele trasate. (vezi fig. 3-89 până la 3-102)

Metoda AVG se poate utiliza relativ ușor, fără probleme, atunci când pentru comparare cu ecoul de defect stă la dispoziție ecoul de la un perete de fund plan al unui segment de material fără defecte. În cazul pieselor rotunde, de ex. piese forjate cilindrice, ecoul de fund poate fi din experiență obținut în același mod, dacă diametrul de curbură este mai mare de 100mm.

Indicația de la ecoul de fund este "cultivată" la înălțimea maximă și reglată cu vârful la o înălțime evidentă pe ecran, de ex. 80% sau 100%. Se notează amplificarea corespunzătoare acestei situații, V_1. Pentru căutarea defectelor, se mărește apoi amplificarea. O măsură în acest sens se poate deduce din diagrama AVG, citind diferența dintre linia celui mai mic defect detectabil la distanța cea mai mare și curba ecoului de fund. În practică, amplificarea este fixată chiar mai mare, pentru ca defectele să nu poată fi trecute cu vederea. Conectarea monitorului de semnal (vezi par. 3.2) este utilă, căci astfel controlorul se poate concentra în întregime asupra dirijării palpatorului și observă ecranul doar când a fost făcut atent despre apariția unei indicații. Această indicație este adusă cu grijă la valoarea maximă și apoi reglată, ca și ecoul de fund în prima etapă, la 80% sau 100% din înălțimea ecranului. Valoarea amplificării, V_2, rezultată astfel, este notată. Ținând seama de parcursurile sonice diferite, din diferența (V_2-V_1) se poate citi mărimea echivalentă a defectului, luând eventual în considerație și influența atenuării ultrasunetelor. Ea nu mai poate fi neglijată atunci când depășește cca. 2-3 dB, valoare normală pentru o *eroare de măsurare* provocată de operator. Diagrama AVG nu conține valori ale *atenuării ultrasonice*.

În general se recomandă următorul procedeu: se stabilește diferența în dB între două ecouri de fund de la distanțe diferite sau - în cazul stratului de protecție moale al palpatorului - de la două ecouri succesive ale unei serii multiple de ecouri de fund, iar valoarea obținută se compară cu cea determinată pe diagrama AVG. Diferența ΔV, în dB, dintre valoarea din diagramă și cea măsurată este atribuită efectului atenuării sonice. Din ea se calculează *coeficientul de atenuare sonică* α prin relația:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{2A} \qquad (3\text{-}15)$$

unde A este drumul sonic simplu prin material.

În cazul indicațiilor provenind de la o distanță mai mică decât a primului ecou de fund, la valori ridicate ale atenuării rezultă mărimi echivalente de defect prea mari, este deci necesară o corecție de amplificare, realizabilă astfel:

1) stabilirea mărimii echivalente de defect conform AVG fără considerarea atenuării sonice

2) corectarea cu

$$\Delta V = 2\alpha \cdot \Delta A \qquad (3\text{-}16)$$

unde ΔV este amplificarea suplimentară, iar ΔA diferența de drum RE-FE. Această valoare se adaugă diferenței de amplificare stabilită la punctul 1 și astfel rezultă valoarea corectă a mărimii echivalente a defectului [55]. În continuare sunt prezentate două exemple.

Exemplul 1. O țagă pătrată laminată din oțel cu granulație fină cu lungimea de 250mm este examinată pentru defecte interne cu un palpator de 2 MHz și 24 mm diametrul oscilatorului. La cuplarea palpatorului pe o zonă fără defecte cel de al doilea ecou de fund este cu 6-7 dB mai mic decât primul; din diagrama AVG rezultă o diferență de 6dB. Diferența de sub 1dB se datorește influenței atenuării, care aici este totuși

neglijabilă. Coeficientul de atenuare sonică se calculează conform formulei (3-15):

$$\alpha = 1\ dB/(2 \cdot 250mm) = 2\ dB/m$$

Primul ecou de fund se reglează la 80%BSH, iar amplificarea aparatului V_1 se notează (de ex. 22dB). Pentru detectarea sigură a zonelor defecte, amplificarea ar trebui mărită în continuare. Dacă apare de ex. o reflexie din mijlocul ţaglei (125mm), înălţimea indicaţiei se fixează la valoarea dinainte aleasă, de 80%BSH, prin modificarea amplificării aparatului (V_2, de ex. 46dB). Diferenţa de 24 dB şi distanţele se transmit în diagrama AVG; rezultă o mărime echivalentă a defectului de 3mm (fig. 3-85).

Exemplul 2. O ţaglă turnată continuu cu aceleaşi dimensiuni şi aceeaşi viteză sonică, dar cu atenuare sonică însemnată, ce nu poate fi neglijată, este examinată cu acelaşi palpator ca în exemplul anterior. Primul RE de pe o zonă fără defecte necesită acum o amplificare mai mare V_1 (de ex. 36dB) pentru o înălţime de referinţă de 80%BSH; cel de al doilea ecou de fund este, la această calitate de material, cu 16dB mai mic decât primul. În acest caz 10dB sunt datoraţi influenţei atenuării sonice; coeficientul de atenuare are acum, tot prin formula (3-15), valoarea

$$\alpha = 10dB/(2 \cdot 250mm) = 20dB/m$$

Din cauza influenţei lineare a atenuării, curbele RE şi FE din diagrama AVG au o alură curbă (fig. 3-86 şi 3-87). Dacă este considerat din nou primul RE ca mărime de referinţă, ca în exemplul anterior, acelaşi defect din mijlocul piesei ar fi indicat - corespunzător jumătăţii parcursului şi de asemenea jumătăţii valorii atenuării - chiar la o amplificare suplimentară mai mică (aici 19dB) şi deci ar da iluzia unui defect mai mare (fig. 3-88). Trebuie deci introdusă încă o corectură cu valoarea diferenţei dintre parcursurile diferite şi deci şi a diferenţei de atenuare; conform (3-16) rezultă:

$$\Delta V = 2 \cdot 0{,}125m \cdot 20dB/m = 5dB$$

114

şi deci şi valoarea corectă de 3 mm (fig. 3-88).

Folosirea diagramei AVG este limitată datorită zonei de influenţă a impulsului de emisie, de defectul minim ce poate fi evaluat în comparaţie cu lungimea de undă, de absorbţia şi împrăştierea sunetelor în material, ca şi de pragul de zgomot electronic.

În scalele detaşabile AVG pentru aparatele analoge, atenuarea sonică este luată în consideraţie printr-o valoare medie rezultată din experienţă, în vreme ce la aparatele digitale moderne, valorile atenuării se pot programa alături de datele palpatoarelor (vezi par. 3.4.3.3).

3.4.3.3 Calibrarea AVG cu ajutorul blocurilor de etalonare.

Calibrarea conform metodei AVG devine substanţial mai dificilă, iar verdictul controlului mai nesigur când nu avem la dispoziţie nici un ecou de fund. Aceasta este situaţia în cazul controlului îmbinărilor sudate cap la cap cu ajutorul palpatoarelor unghiulare. În

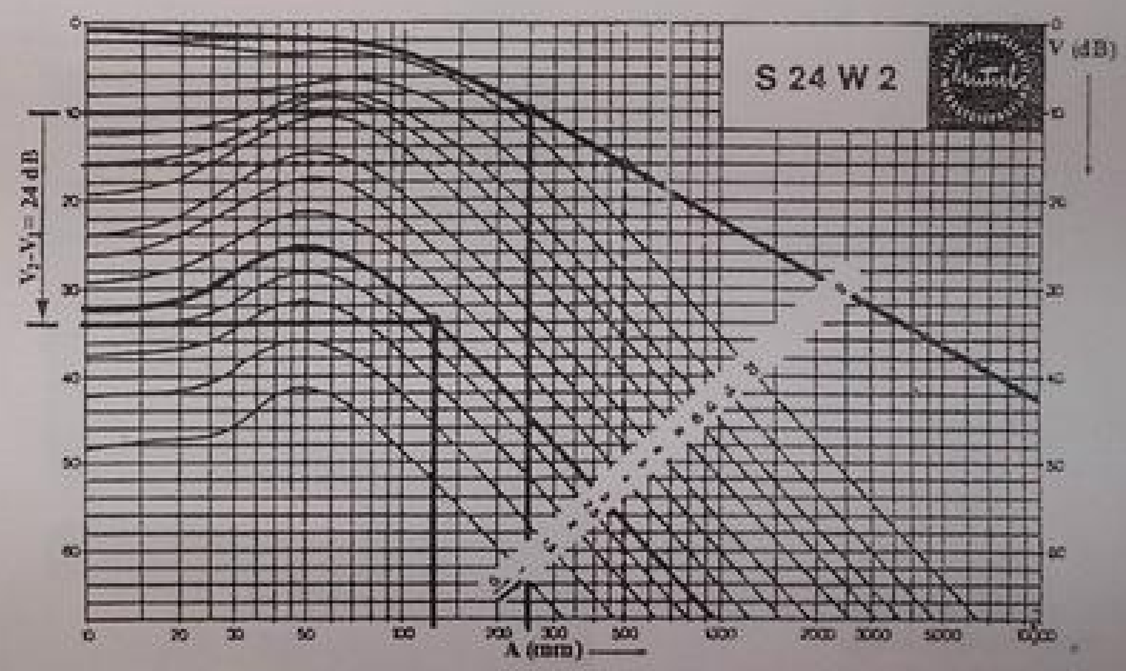


Fig. 3-85 Folosirea diagramei AVG (palpator, 24 mm, 2 MHz); alte explicaţii în text

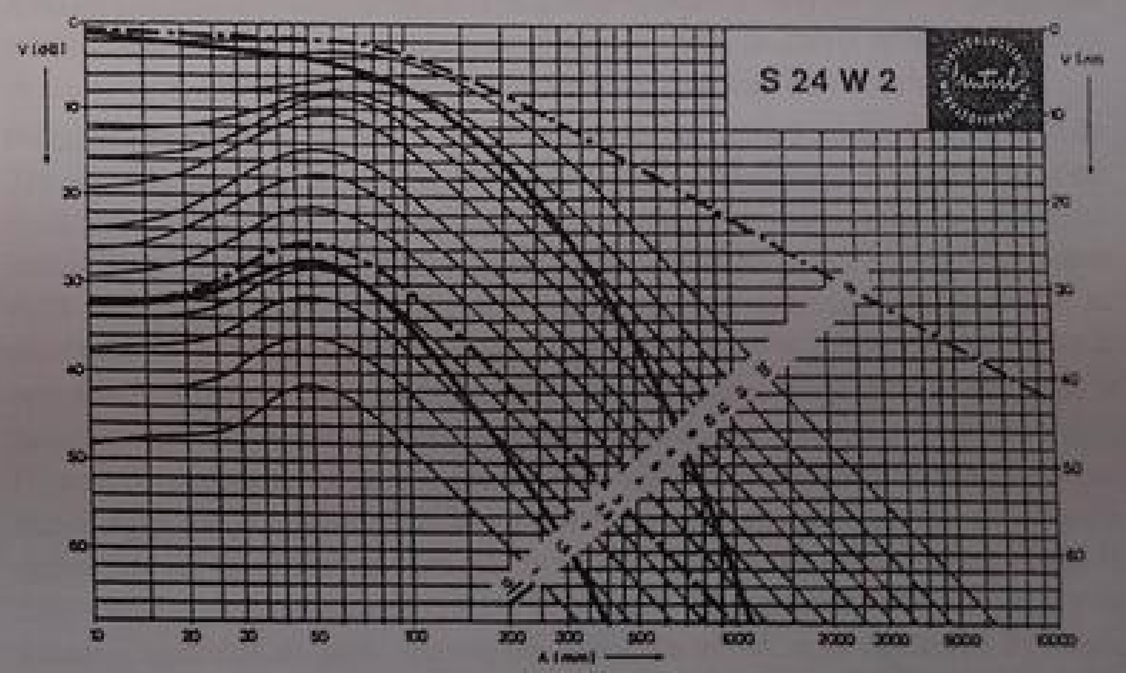


Fig. 3-86 Curba reală a ecoului de fund (RE) şi cea a reflectorului cu diametrul de 3 mm (FE) la atenuare sonică de 30 dB/m (curba linie-punct: fără atenuare sonică)

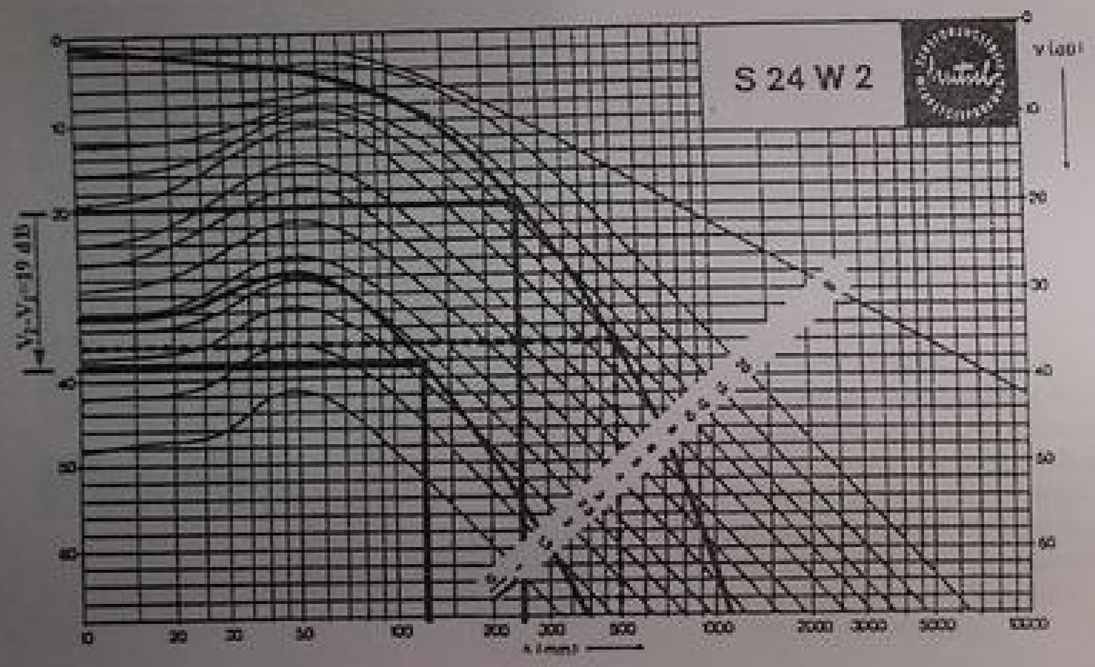


Fig. 3-87 Diferenţă mică de înălţime de ecou din cauza atenuării sonice în comparaţie cu fig. 3-85. Explicaţii în text

116

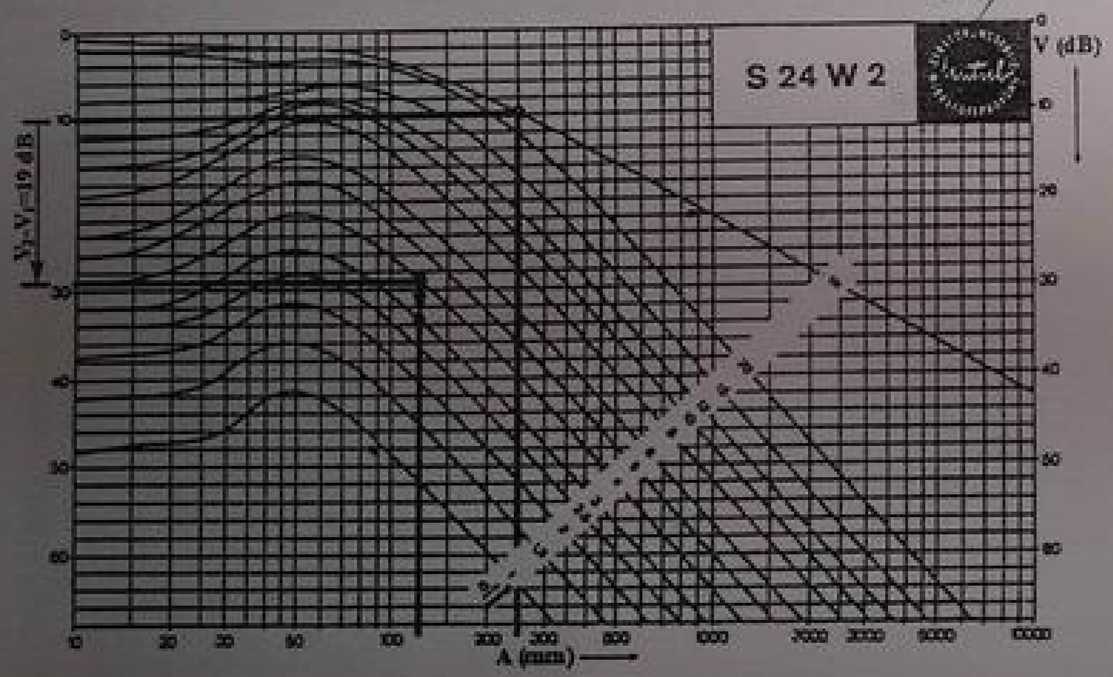


Fig. 3-88 Corectarea influenţei atenuării; explicaţii în text

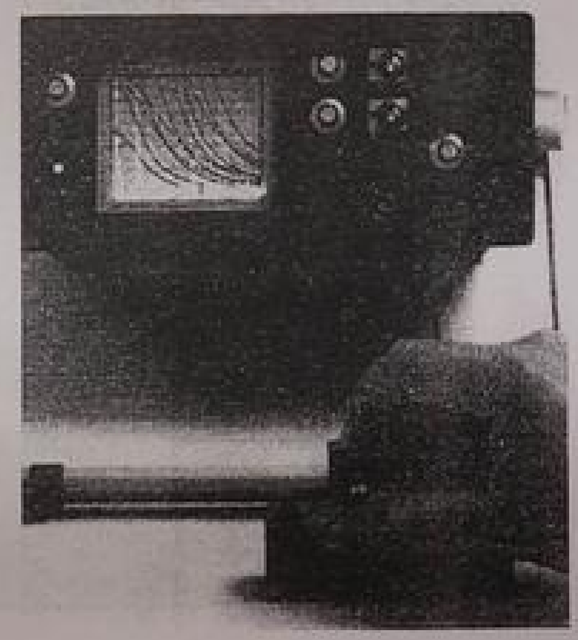


Fig. 3-89 Impulsul de emisie şi seria de ecouri provenind de la blocul de etalonare K 2 (raza 25 mm)

acest caz trebuie folosite pentru comparare blocurile de calibrare normate internaţional K_1 şi K_2. Reflexiile de la diferitele raze ale blocurilor pot fi înregistrate în diagramele AVG ale palpatoarelor unghiulare, ca şi pe scalele detaşabile AVG derivate din diagramă, sub formă de marcaje de referinţă. În cazul palpatoarelor de 2MHz se foloseşte blocul de etalonare K_1, iar în cazul palpatoarelor de 4MHz, blocul mic de etalonare, K_2.

Procedura de calibrare este descrisă exact printr-un exemplu. La o grosime de tablă de 25mm se foloseşte un palpator unghiular de 4MHz şi 45° unghi de palpare. Scala care conţine întreg domeniul îmbinării sudate şi are cea mai mare extindere reprezintă domeniul de măsură până la 100mm, prezentat în distanţă proiectată redusă. La palparea razei de 25mm a blocului K_2 (fig.3-89), indicaţiile rezultate trebuie poziţionate pe marcajele de calibrare corespunzătoare de pe scală (fig. 3-90). Operaţia se realizează prin manevrarea butoanelor de lungime de scală (domeniu de măsură) şi de translaţie punct zero (deplasare). După aceasta se stabilesc *pierderile de transfer*. Diferenţele aproape întotdeauna prezente dintre stările suprafeţelor etalonului şi pieselor trebuie egalizate prin aşa-numita *corecţie de transfer*. Pentru aceasta este necesar un al doilea palpator de acelaşi tip, care este la început aşezat pe blocul de etalonare, faţă în faţă cu celălalt, într-o *dispunere* în V sau în W (fig. 3-91). Valoarea maximă a impulsului transmis, cultivată cu grijă, este reglată astfel ca vârful să atingă curba întreruptă superioară (linie-punct) "K" trasată pe scala detaşabilă (fig. 3-92). Aşezând apoi cele două palpatoare pe piesă, din nou în aceeaşi dispunere V sau W (fig. 3-93) - din cauza grosimii diferite rezultă o altă distanţă între palpatoare - impulsul maxim de transmisie s-ar aşeza pe cea de a doua curbă întreruptă (linie-linie) "T" de pe scală doar când

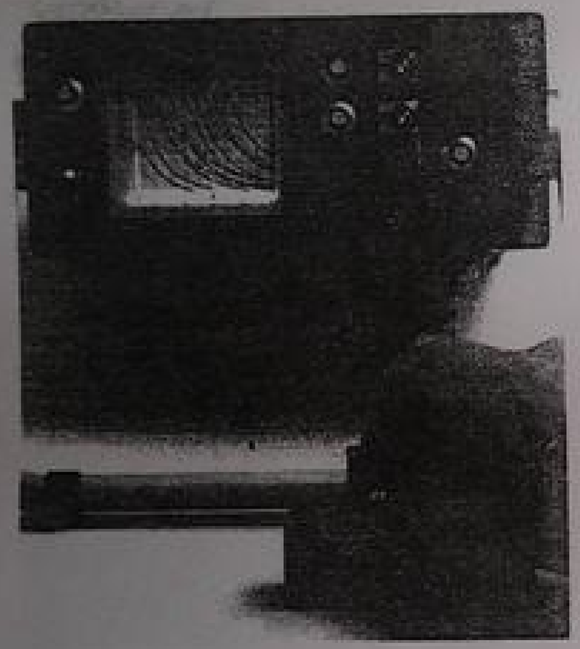


Fig. 3-90 Calibrarea distanței: așezarea primului și celui de al doilea ecou, provenite de la blocul de etalonare K 2 pe marcajele de calibrare de pe scala detașabilă (primul ecou din butonul "deplasare", al doilea ecou din butonul "domeniu de măsură"; procedura se repetă până când se obține așezarea dorită)

starea suprafeței ar fi identică cu cea a etalonului. Cele două curbe de calibrare sunt cu atât mai diferite, cu cât sunt mai diferiți coeficienții de atenuare sonică din piesă și din etalon. Diferențele acestea sunt în cazul palpatoarelor de 2 MHz în general neglijabile, încât pentru aceste palpatoare se ia în calcul doar o singură curbă. În cazul prezentat mai înainte este totuși necesară o corecție: ecoul este poziționat pe curba întreruptă

118

Fig. 3-91 Dispunere pentru parcurs în W pe blocul K 2 pentru stabilirea pierderii de transfer

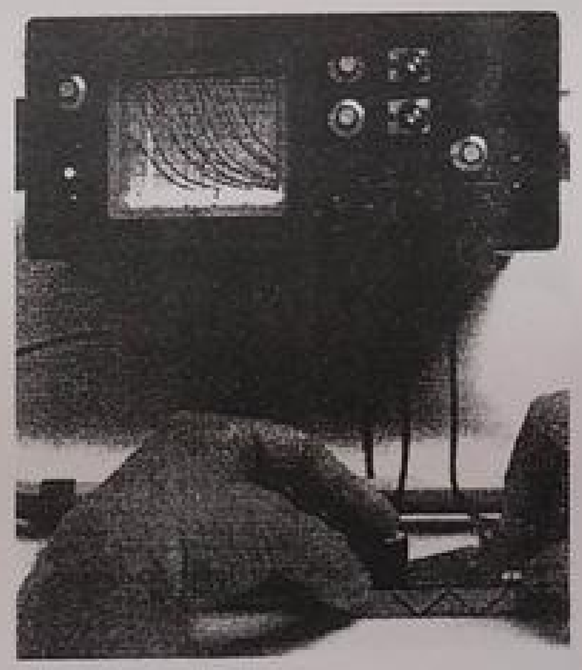


Fig. 3-92 Așezarea impulsului transmis pe curba superioară de corecție a transferului (linie-punct). Amplificarea aparatului: 24 dB.

inferioară (fig. 3-94) și mărirea amplificării necesară acestei operații este înregistrată. Această mărire este identică cu pierderile prin transfer, în acest caz 2dB (fig 3-92 și 3-94). După terminarea calibrării sensibilității, această valoare trebuie adăugată.

Pierderile de transfer nu se stabilesc așa ușor cum apar în această explicație. La așezarea față în față a celor două palpatoare, amplitudinea maximă de transmisie trebuie

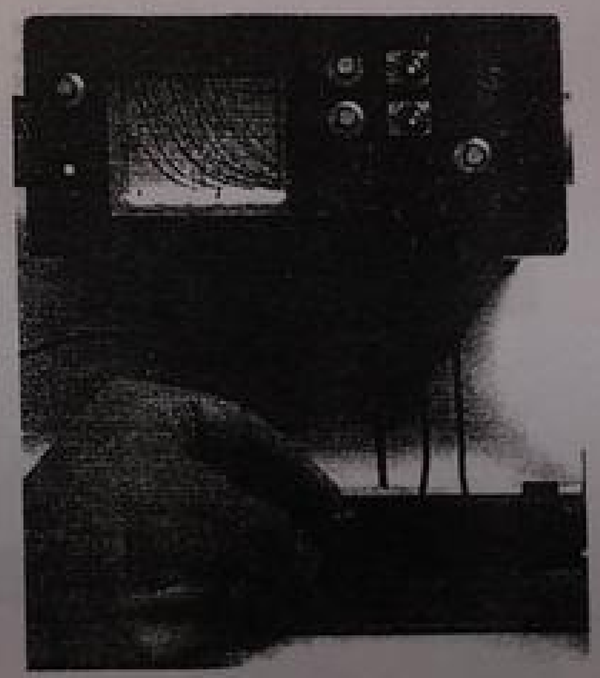


Fig. 3-93 Parcursul W prin piesa de controlat

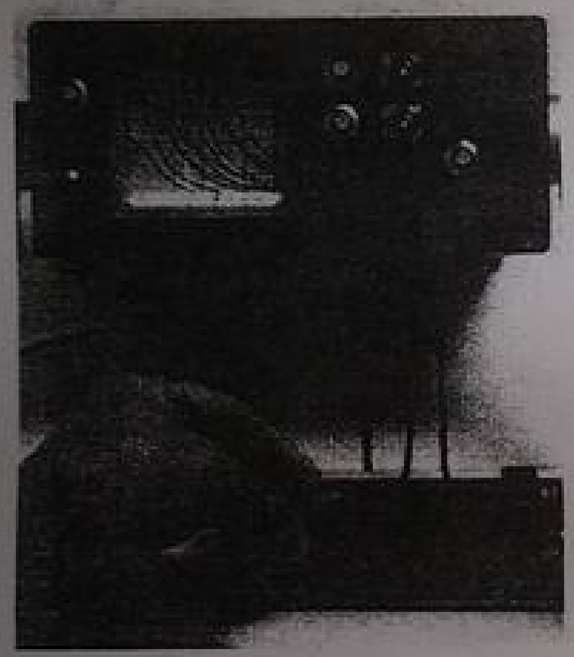


Fig. 3-94 Așezarea impulsului transmis pe curba inferioară de corecție a transferului (linie întreruptă). Amplificarea aparatului: 26 dB; Pierderea de transfer: 26 dB - 24 dB (fig. 3-92) = 2 db

"cultivată" cu deosebită atenție. Manevrarea butonului de amplificare, necesară reglării vârfului semnalului pe curbele întrerupte ar trebui realizată de un al doilea operator.

Fără calcule se poate stabili printr-o simplă operație ulterioară de calibrare pe piesă în ce zonă a ecranului se va reprezenta acum îmbinarea sudată. În acest scop se realizează

Fig. 3-95 Palparea muchiei inferioare a piesei de controlat la jumătatea distanței de palpare

Fig. 3-96 Marcarea poziției ecoului de la semidistanța de palpare pe scala mobilă AVG

palparea unei muchii a piesei. Dacă palpatorul se găsește la jumătatea distanței de palpare, rezultă o reflexie clară de la muchia inferioară a marginii piesei (fig 3-95), iar dacă poziția palpatorului coincide cu distanța de palpare, reflexia apare de la muchia superioară (fig. 3-98). Zona situată între aceste două indicații poate fi însemnată cu tuș pe ecran prin simbolul îmbinării sudate și considerată domeniu supravegheat (fig. 3-96 până la 3-99). În acest mod, pe scala detașabilă se poate citi poziția în adâncime a unui reflector (vezi și par. 3.4.2.2).

Fig. 3-97 Poziția ecoului de la semidistanța de palpare (corespunzând părții de jos a îmbinării sudate) este marcată

Fig.3-98 Aceeași procedură se realizează cu ecoul de la muchia de sus, la întreaga distanță de palpare

Sensibilitatea aparatului se reglează tot cu ajutorul ecoului de la raza de 25 mm a blocului de etalonare K_2. Pe scala folosită în exemplul prezentat, prima reflexie de la raza etalonului trebuie să atingă înălțimea marcajului corespunzător (R2) (fig. 3-99). Apoi amplificarea se mărește cu o valoare indicată pe scală, în exemplul prezentat 30dB (fig 3-100). La sfârșit urmează corecția de transfer (fig. 3-101).

122

Fig. 3-99 Simbolul îmbinării sudate pe scala detașabilă; palparea razei de 25 mm a blocului K 2 în vederea calibrării sensibilității: primul ecou, adus în poziția maximă,trebuie să se găsească cu vârful în cercul marcat "R 2" de pe scală. Amplificarea aparatului 30 dB (comutatorul cu reglaj grosier)

Fig. 3-100 Mărirea amplificării aparatului, conform indicațiilor de pe scala detașabilă AVG (dreapta sus), cu 30 dB. Amplificarea totală: 60 dB (30 dB comutatorul cu reglaj grosier +30 dB comutatorul în trepte)

Prin această operație, calibrarea este complet terminată. Acum palpatorul este condus conf. fig. 3-71 aproximativ perpendicular pe îmbinare și cu ușoare înclinări, înainte și înapoi, astfel ca fasciculul să cuprindă succesiv întreaga grosime a îmbinării. În cazul apariției indicațiilor, este necesară căutarea maximelor acestora. Apoi se poate citi pe scală cărui defect echivalent de formă circulară îi corespunde fiecare reflexie. Dacă a fost definită mai înainte o *limită de evaluare*, respectiv de *înregistrare*,

- 3-101 Mărirea în continuare a amplificării aparatului cu valoarea pierderii de transfer (2 dB, vezi fig. 3-94). Amplificarea totală = sensibilitatea de control: 62 dB (30 dB comutatorul cu reglaj grosier +32 dB comutatorul în trepte)

atunci sunt prescrise obligatoriu concluziile necesare. În exemplul dinainte rezultă indicații ale căror mărimi corespund mărimii echivalente de defect 2 (fig.3-102). Dacă indicația de defect depășește înălțimea ecranului, se recomandă o reducere a amplificării cu 12 dB. Mărimea echivalentă de defect citită în aceste condiții trebuie dublată (vezi par. 3.4.3.2). La aparatele digitale, se introduc în memoria de evaluare fie diagramele AVG ale palpatoarelor alese, cu frecvențele și diametrele oscilatorilor care apar mai des, fie o diagramă AVG universală cu alegere complet liberă a parametrilor palpatoarelor. Astfel calibrarea sensibilității și evaluarea defectelor se pot realiza substanțial mai simplu. Se determină automat înălțimea oricărui ecou situat în domeniul diafragmei monitorului, iar mărimea defectului echivalent, calculată din înălțimea ecoului, este prezentată pe ecran sub formă de valoare numerică (în milimetri disc circular). Unele aparate oferă și posibilitatea ca, în plus, în cadrul pierderilor de transfer să fie luată în considerație o atenuare datorată materialului, prin absorbție sau împrăștiere ultrasonică. Atenuarea sonică, care trebuie să fie bineînțeles cunoscută, iar în caz contrar să fie determinată, este prezentată în dB/m. La calibrarea sensibilității și la stabilirea mărimii defectului echivalent este determinată automat valoarea în dB a atenuării datorată parcursului anterior în material și apoi adăugată la înălțimea măsurată a ecoului.

124

Fig. 3-102 Detectarea unei zone de reflexie: date: 32 mm în fața muchiei anterioare a palpatorului (distanță proiectată redusă), conform scării de pe scala mobilă; cca 0,25 din grosimea tablei (cca 6 mm) față de fața superioară (simbolul îmbinării) și mărimea reflectorului echivalent 2 mm KSR

3.4.3.4 Metoda liniilor de referință

Această metodă de evaluare este denumită *metoda DAC* (engleză), *DAK* (germană), *metoda liniilor de referință* sau *metoda liniilor de comparație*. Comparativ cu metoda AVG, ea are avantajul că toate corecțiile necesare, constând din valori estimate, valori preluate sau valori rezultate din practică dispar, atunci când drept bază de evaluare este folosită o bucată din același material și cu aceeași stare a suprafeței ca cea a piesei de examinat. Prin acest sistem pierderile datorate atenuării și cele datorate transferului sunt luate în considerație fără posibilitate de greșeală. Astfel s-a impus această metodă pe plan internațional mult mai puternic decât metoda AVG, în special în cazul palpării înclinate. În Elveția a fost propusă de Hornung[56], în Germania de Trumpfheller[57]. În SUA metoda reprezintă o parte componentă a reglementărilor *ASTM* și *ASME*. Și în cele mai noi proiecte de norme europene apare această metodă pentru utilizare la controlul îmbinărilor sudate.

În funcție de grosimea materialului sunt practicate lateral una sau mai multe orificii transversale la adâncimi diferite, care sunt palpate din diferite poziții (fig 3-103). Rezultă o mulțime de poziții și înălțimi de ecou, iar vârfurile ecourilor se unesc printr-o curbă, *linia de referință* sau *DAC*, pe o scală mobilă transparentă, fixată în fața ecranului defectoscopului (fig. 3-104). Condiția de bază este ca adâncimea orificiului să fie mai mare decât lățimea fasciculului. Adecvate scopului s-au dovedit diametrele de 2 sau 3 mm ale orificiilor, ale căror amplitudini de ecou sunt folosite des ca măsură de evaluare fără alte modificări de amplificare; în anumite cazuri - depinzând de solicitarea ulterioară a îmbinării - trebuie luată în considerație o majorare sau o scădere a amplificării cu o anumită valoare în dB. În afară de aceasta, linia de referință de -6dB (jumătatea valorii) servește drept "limită de înregistrare", adică indicațiile care depășesc aceste curbe trebuie specificate în buletin.

Curbele de evaluare se stabilesc la fel pentru toate unghiurile, respectiv cu o eroare neglijabilă.

Acest fapt a condus la inventarea unei scale mobile universale[58]: deoarece în cazurile normale se controlează întotdeauna în același raport al distanțelor, independent de grosimea tablei (de ex. de la jumătatea distanței de palpare până la valoarea întreagă a acesteia plus lățimea îmbinării), aceasta înseamnă și un raport constant al înălțimilor ecourilor; chiar la considerarea unor valori ale atenuării se poate arăta că eroarea se află mult sub valoarea erorii "umane"[50] și prin aceasta este neglijabilă. La o prezentare între 0,25 și 1,25 din distanța de palpare, se pot controla și zonele de influență termică. Singura condiție este ca secțiunea de îmbinare care se examinează să se afle în zona câmpului depărtat al palpatorului. Fig 3-105 prezintă o astfel de scală mobilă universală, iar fig. 3-106 până la 3-111 arată procedura de lucru.

Cea mai nouă propunere de normă europeană, amintită deja, utilizează printre altele tot curbe DAK, dar și toate celelalte criterii cu capacitate de confirmare pentru evaluarea defectelor, cum sunt diferențele de înălțime a ecourilor dependente de valoarea unghiului, forma impulsurilor ecourilor, dinamica ecoului și eventual controalele de completare. Toate aceste criterii sunt cuprinse într-o schemă de desfășurare, care, dacă este urmată, poate duce la minimalizarea efortului total.

Grosimea d (mm)	Distanța orificiilor h
10-15	în mijloc
15-20	$h = d - 10$
20-40	$h = \frac{d-10}{2}$
40-80	$h = \frac{d-10}{3}$
80-150	$h = \frac{d-10}{4}$

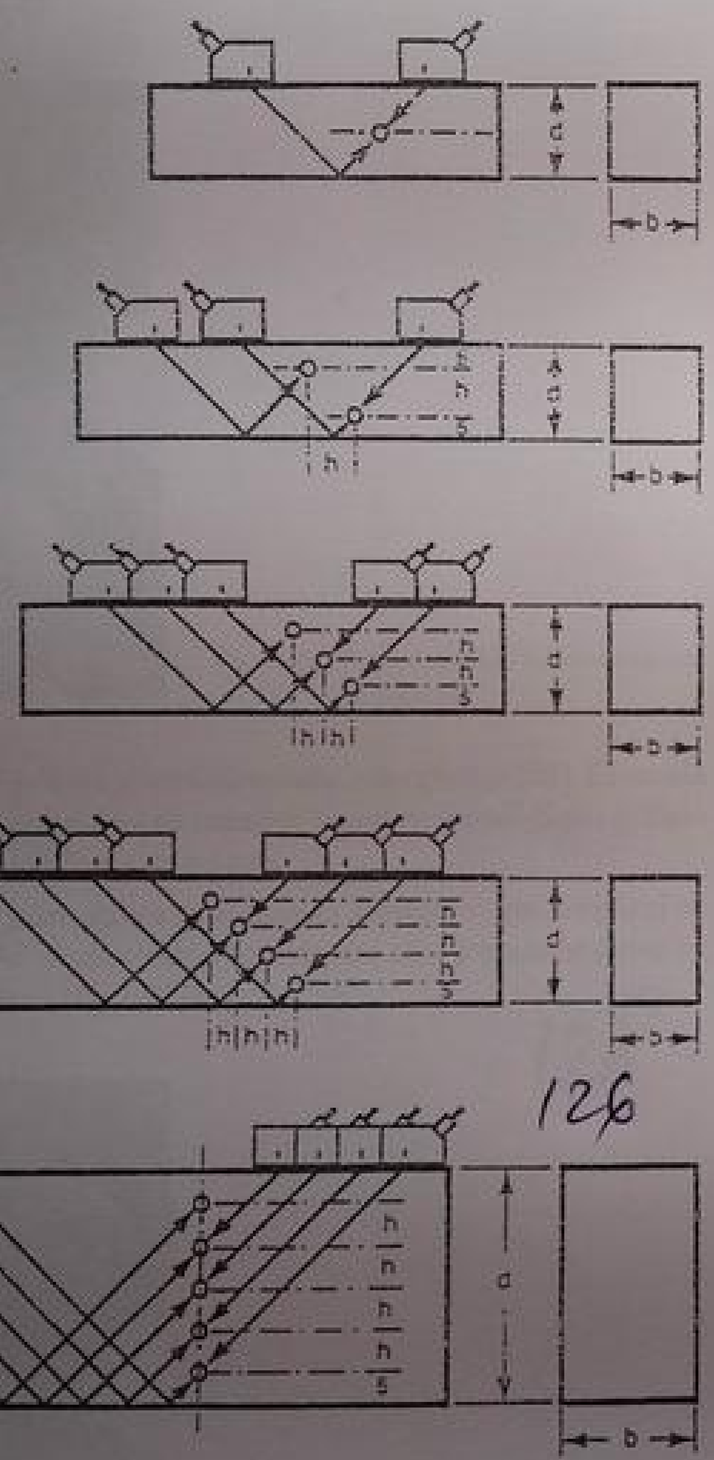


Fig. 3-103 Corpuri de referință pentru metoda DAK în funcție de grosimea materialului. Diametrul orificiului 3 mm; distanța orificiilor h; lățimea $b = \frac{2 \cdot \lambda \cdot s}{D_k}$

în cazul oscilatorilor dreptunghiulari N și de aici D_k se pot calcula din formulele (2-12) și (2-17)

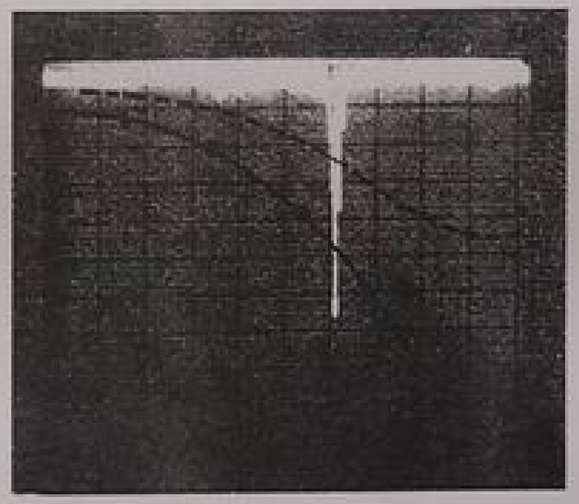


Fig. 3-104 Curba DAK și limita de înregistrare (-6 dB, linie întreruptă) în fața ecranului defectoscopului

Siguranța controlului care poate fi obținută depinde hotărâtor de precizia cu care au fost confecționate orificiile de referință. Calibrarea cu ajutorul orificiilor transversale se poate executa și atunci când trebuie să se lucreze prin metoda AVG. Orificiile cilindrice și discurile circulare se pot calcula conform unei formule prezentate de Wüstenberg[53]:

$$D_k = \sqrt{\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \lambda \cdot \sqrt{D_z \cdot s}} = 0{,}67 \cdot \sqrt{\frac{c}{f} \cdot \sqrt{D_z \cdot s}} \qquad (3\text{-}17)$$

respectiv

$$D_z = \frac{D_k^4}{2 \cdot s} \cdot \frac{\pi^2}{\lambda^2} = 4{,}93 \cdot \frac{D_k^4 \cdot f^2}{s \cdot c^2} \qquad (3\text{-}18)$$

unde D_k este diametrul discului circular, D_z este diametrul orificiului cilindric, c este viteza sonică, f este frecvența, s este parcursul sonic iar λ este lungimea de undă.

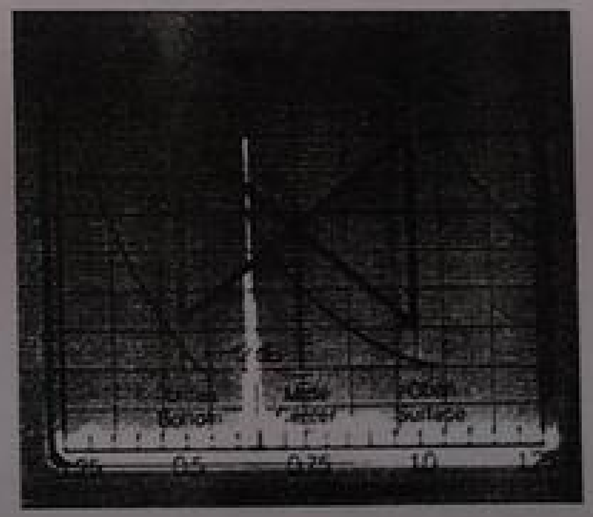


Fig. 3-105 Scală mobilă universală cu simbolul îmbinării sudate desenat [59]

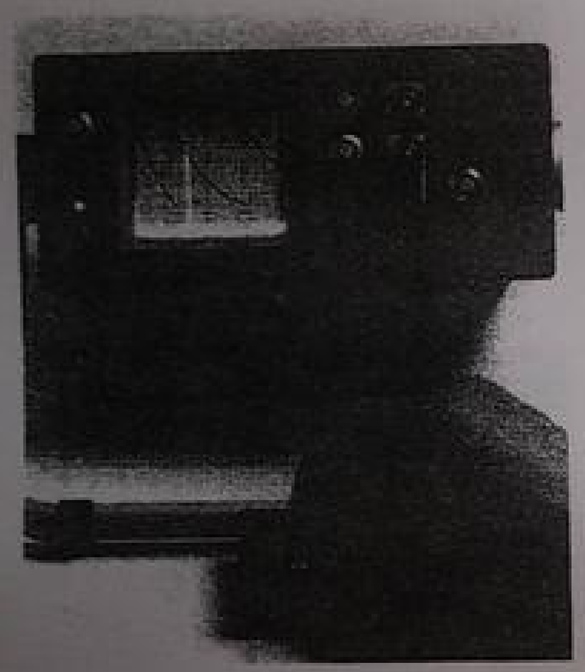


Fig. 3-106 Palparea muchiei inferioare a piesei de controlat

În cazul tablelor subțiri poate fi folosită și *metoda ecoului ede referință* [59]. Ea constă în realizarea unei comparații cu un defect de referință (canal pe suprafață sau orificiu cilindric în mijlocul secțiunii), indiferent de parcurs.

Metoda liniilor de referință se poate aplica de asemenea substanțial mai simplu și cu aparatele digitale. Curbele DAK determinate experimental sunt prezentate direct pe ecran și sunt memorizate în aparat (fig.3-112).

128

Fig. 3-107 Deplasarea poziției ecoului până pe marcajul corespunzător de pe scală (0,5) (vezi și fig. 3-105)

Fig. 3-108 Palparea muchiei superioare a piesei de controlat

Evaluarea prin linii de referință se poate realiza de asemenea cu piese de probă cu orificii corespunzător practicate. Acest lucru este prescris în nenumărate reglementări, de ex. în SUA (ASTM) și Elveția (SVDB). Această metodă are avantajul că orificiile de referință pot fi practicate și măsurate cu precizie mai ridicată în laborator decât la locul de muncă. Pe de altă parte, similar cu cazul folosirii blocurilor de etalonare K1 și K2 în cadrul metodei AVG, trebuie să se țină seama și să fie corijate diferențele dintre

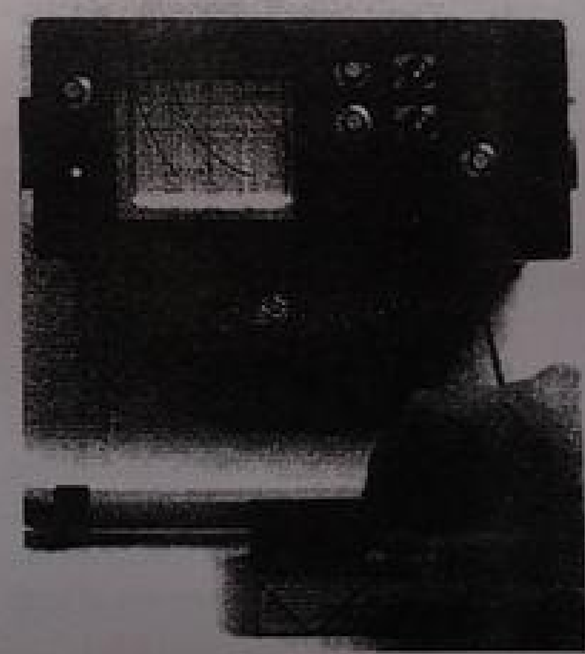


Fig. 3-109 Depărtarea poziției ecoului până la marcajul corespunzător de pe scală (1,0). Aceste două operații (fig. 3-106 până la fig. 3-109) se repetă până când cele două poziții ale ecoului sunt corect calibrate. **Notă:** alternativ, în locul muchiei piesei, se poate folosi orificiul de referință din mijlocul tablei (în special în cazul palpatoarelor unghiulare de 60°); orificiul se palpează de la distanțe corespunzând unui sfert, respectiv cinci sferturi din distanța de palpare, iar ecourile corespunzătoare se așază pe diviziunile 0,25 și 0,25 ale scalei mobile

Fig. 3-110 Orificiul de referință se palpează de la distanța corespunzând la trei sferturi din distanța de palpare; vârful ecoului se calibrează pe curba de evaluare, apoi (în funcție de specificația de control) se aplică o anumită creștere sau diminuare de amplificare (aici - creștere de 4 dB). Amplificarea aparatului = sensibilitatea de control: 52 dB (30 dB comutatorul cu reglaj grosier + 22 dB comutatorul în trepte)

piesa de probă și materialul de examinat, referitoare la starea suprafeței, la atenuarea sonică și la viteza sonică.

3.4.3.5 Alte posibilități de descriere a defectelor

După cum s-a explicat deja, din timpul de parcurs al ecoului, se poate stabili fără greutate distanța a_1 (fig.3-113) dintre suprafața de cuplare și suprafața reflectantă a

130

Fig. 3-111 Detectarea unei zone de reflexie într-o tablă sudată de 25 mm grosime; Date: distanța: 0,8 · a_1 față de punctul de ieșire al fasciculului (42,5 mm), conform scării de distanță de pe scală; poziția în adâncime: 0,3 · d (7,5 mm), conform scării de pe scală; mărimea: 6 dB peste linia de referință

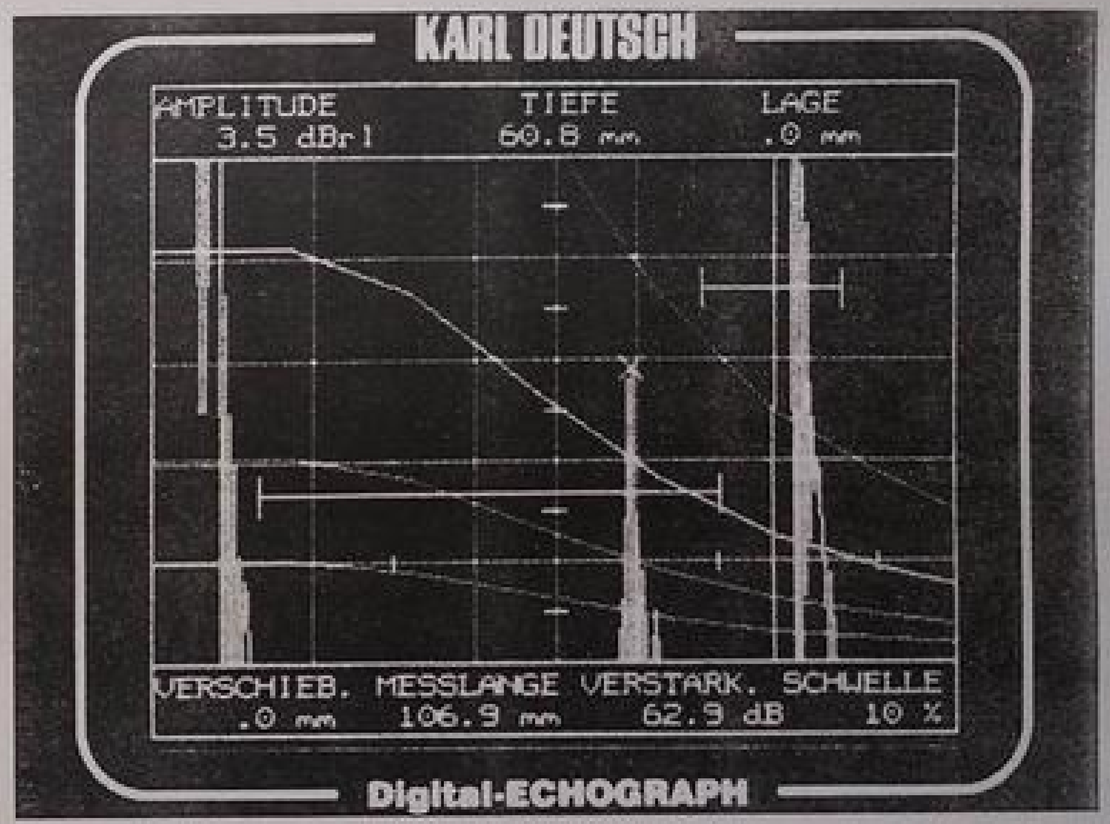


Fig. 3-112 Curbe DAK și diafragme ale monitorului pe ecranul unui aparat ultrasonic digital

defectului, în vreme ce suprafața opusă a acestuia nu este indicată. Din această cauză nu este posibil ca dintr-o singură măsurătoare să se determine extinderea defectului pe direcția de incidență a fasciculului. Printr-o a doua măsurătoare din direcție contrară se poate răspunde imediat și fără dificultăți la această întrebare (fig. 3-114). Dacă suma distanțelor a_1 și a_2 este egală cu grosimea materialului d în direcția de incidență, atunci zona defectă nu are practic extensie pe această direcție. Dacă suma distanțelor este mai mică, atunci extensia defectului se stabilește din diferența:

$$x_1 = d - (a_1 + a_2) \qquad (3\text{-}19)$$

Alte măsurători, din direcții diferite, pot oferi informații suplimentare asupra poziției, mărimii și configurației zonei defecte.

Forma ecoului de defect permite și alte concluzii, în primul rând privind configurația suprafeței neomogenităților detectate. În vreme ce un defect cu margini netede dă naștere unui ecou relativ îngust, clar definit, un defect puternic despicat, cu adâncimi diferite sau cu porțiuni din suprafața reflectantă înclinate, provoacă un ecou "crăpat" corespunzător, mult lărgit și cu amplitudine redusă (fig.3-115), care își modifică forma chiar la o mișcare ușoară a palpatorului.

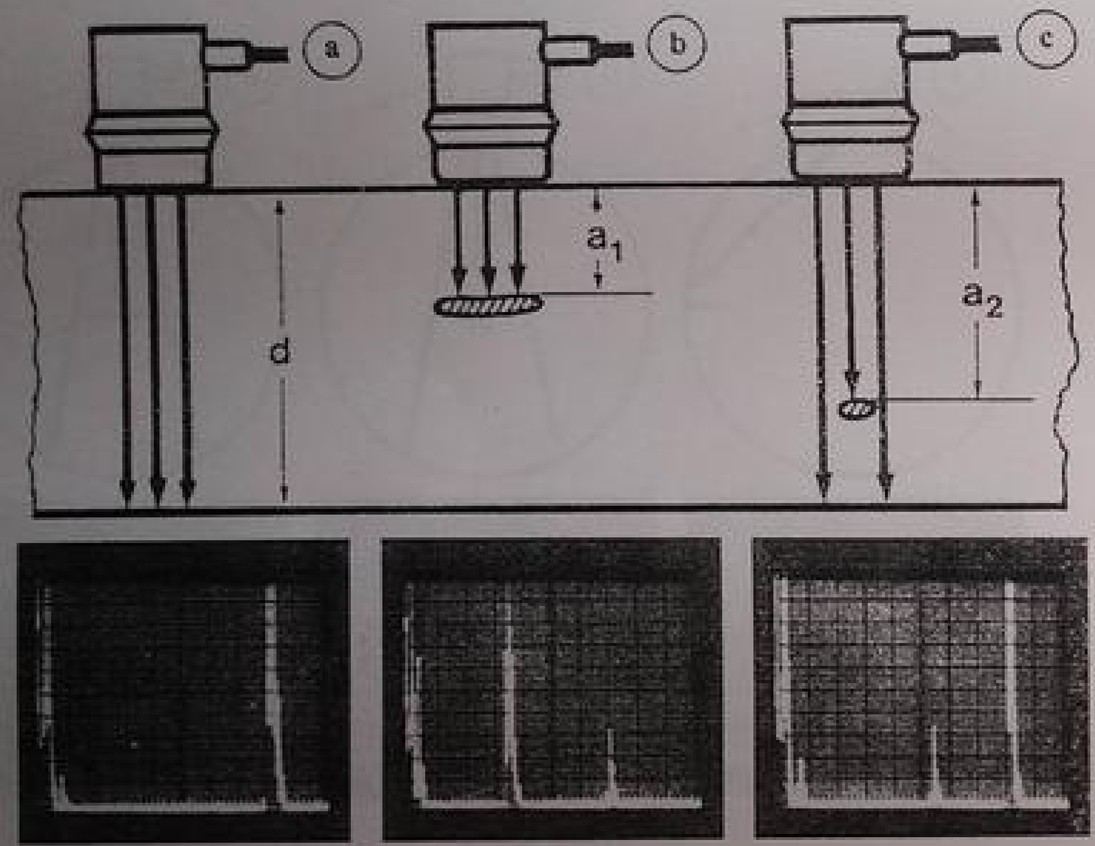


Fig. 3-113 Stabilirea distanței zonelor defecte: a) fără defect; b) defect mare, cu ecou repetat; c) defect mai mic la distanță mai mare

132

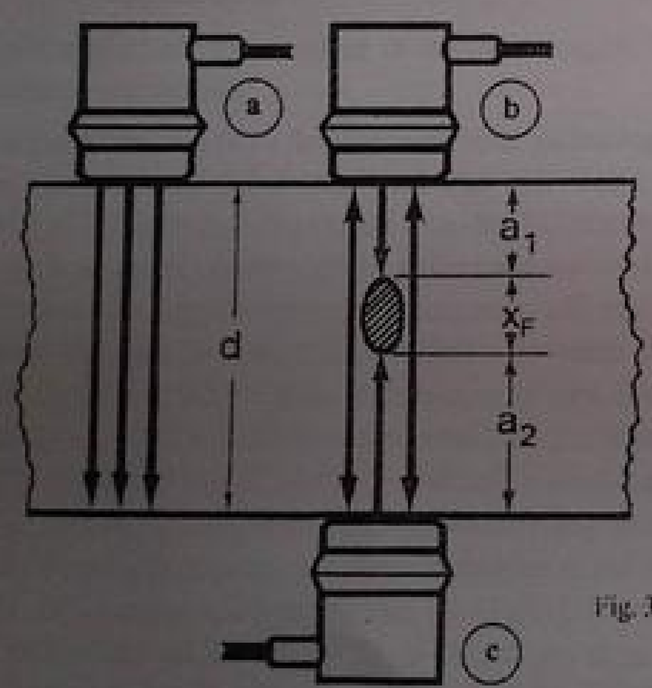


Fig. 3-114 Stabilirea extensiei defectului prin măsurători de pe două fețe. Explicații în text.

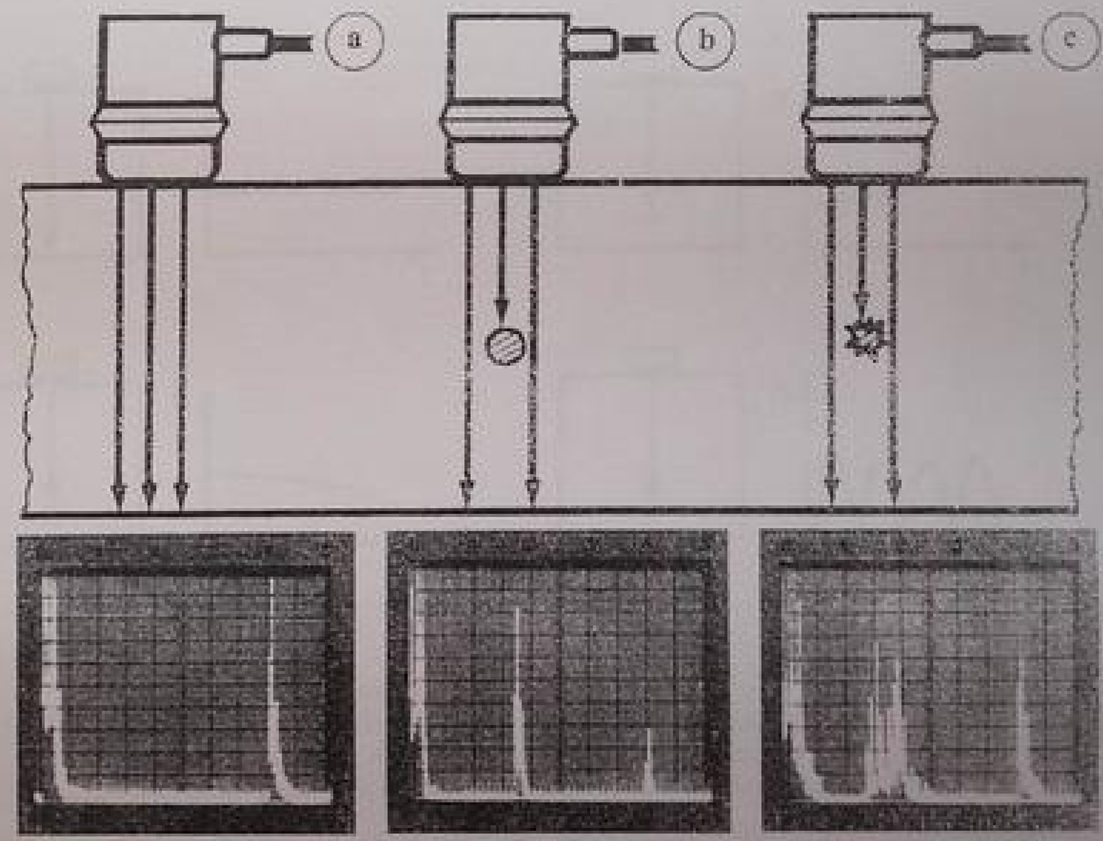


Fig. 3-115 Stabilirea stării suprafeței defectului: a) fără defect; b) defect cu margini netede; c) defect despicat (amplificare mărită față de cazurile a și b)

Prin *dinamica ecoului* se înțelege comportarea timpului de parcurs și/sau amplitudinii în funcție de mișcarea relativă dintre palpator și obiectul de examinat. Fig. 3-116 prezintă aceasta prin exemple simple: defectul interior plan, nevoluminos, situat în mijlocul piesei (a) apare doar din două poziții diametral opuse ale palpatorului, la o distanță constantă a ecoului și cu o amplitudine puternic fluctuantă a acestuia; defectul interior cilindric, situat în mijlocul piesei (b) nu prezintă dinamică, adică prezintă mereu aceeași amplitudine și același timp de parcurs în oricare din pozițiile palpatorului. Un defect situat excentric ar apare cu timp variabil de parcurs și cu fluctuații reduse ale amplitudinii, în vreme ce o fisură longitudinală de suprafață (c) prezintă variații substanțiale de amplitudine și timp de parcurs.

3.4.3.6 Descrierea computerizată a defectelor

În domeniul controlului materialelor există de mult dorința de a putea obține cât mai rapid posibil o imagine cuprinzătoare asupra structurii interne a unui material, din care să reiasă în special poziția și conturul exact al tuturor neomogenităților prezente. În cele ce urmează vor fi descrise pe scurt câteva dintre cele mai importante metode de

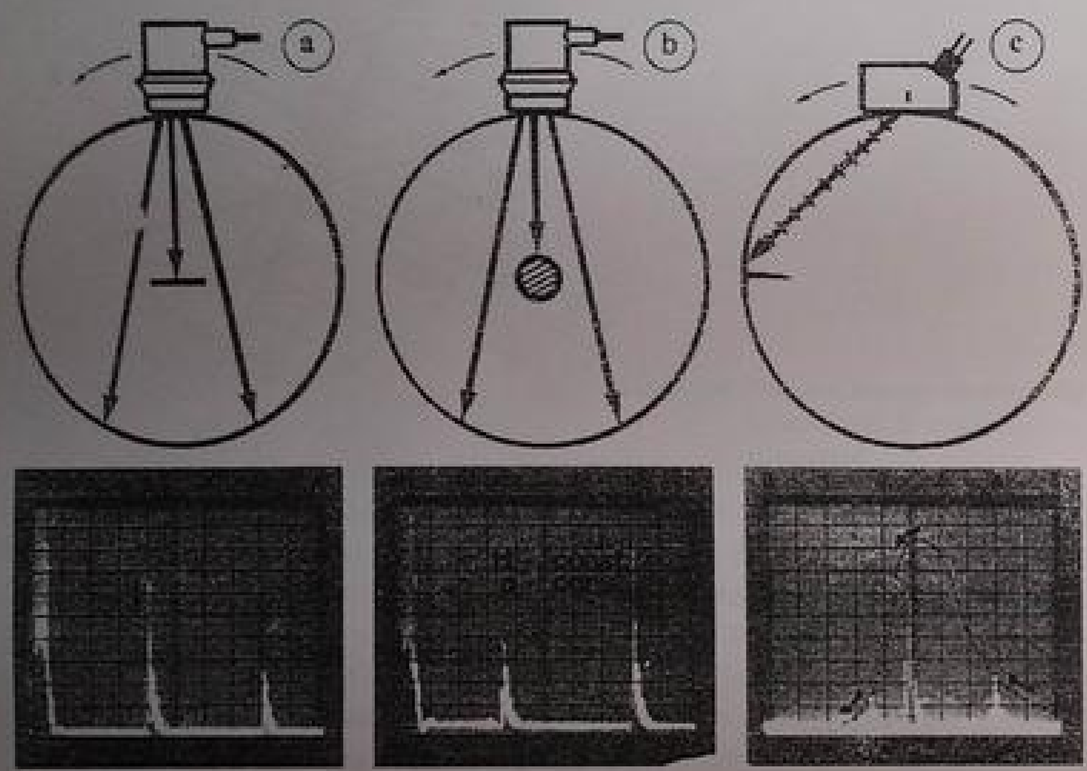


Fig. 3-116 Dinamica ecoului la deplasarea relativă a palpatorului sau piesei de controlat. Exemple simple; explicații în text.
a = timp de parcurs al ecoului, respectiv distanței ecoului
H = înălțimea ecoului

134

încercări nedistructive care oferă ca rezultat imagini. Pentru detalii se recomandă literatura de specialitate.

Prin noțiunea de *control cu frecvență multiplă* se înțelege totalitatea încercărilor de a obține prin folosirea mai multor frecvențe, mai multe informații asupra mărimii și formei unui reflector decât furnizează metoda AVG printr-o singură frecvență. Procedeul se bazează pe faptul că proprietățile reflectante ale unui defect se modifică o dată cu modificarea frecvenței de control. Faptul este cu atât mai evident cu cât defectul deține un contur mai plat, în vreme ce un reflector de formă sferică reflectă practic egal în toate direcțiile frecvențele aflate în domeniul în care diametrul lui este mai mic decât lungimea de undă. Controalele cu frecvență multiplă se pot efectua de ex.cu palpatoare cu bandă largă și cu aparate ultrasonice ale căror emițătoare produc așa-zisele semnale CS (fig. 3-21 c). Din cauza influențelor multitudinii geometriilor defectelor, greu de trecut cu vederea în practică, prin această tehnică se pot obține rezultate satisfăcătoare doar în puține cazuri speciale, vezi de ex. [60,61]. Aceeași situație se întâlnește și în cazul metodei de *analizu frecvenței*, la care se pot trage concluzii asupra geometriei reflectorului din distribuția spectrului ecoului (fig. 3-117).

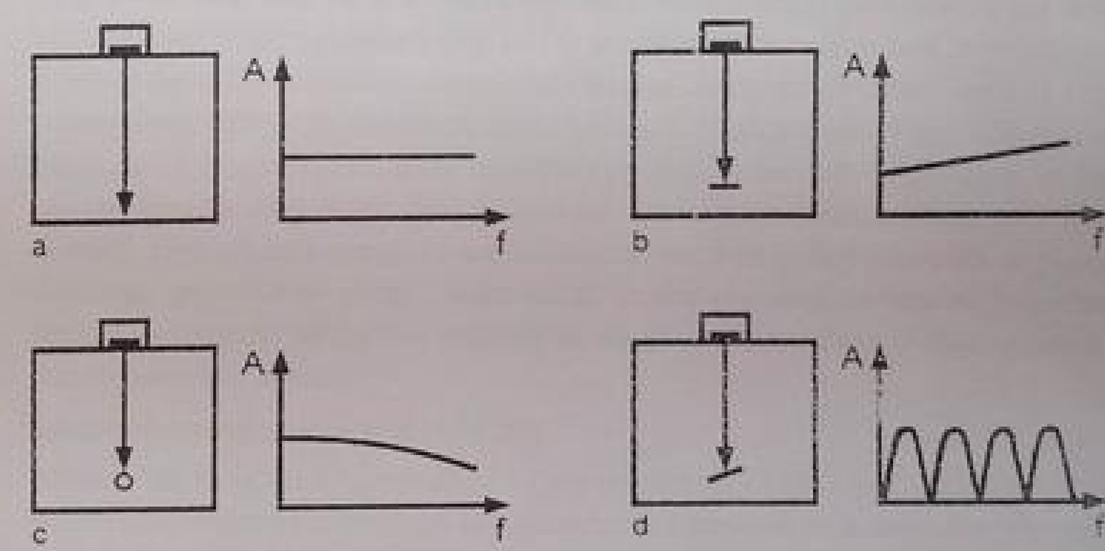


Fig. 3-117 Analiza frecvenței [60]:
a) ecou de fund: distribuție constantă a frecvențelor
b) discontinuitate plană mică: distribuție crescătoare a frecvențelor
c) discontinuitate cilindrică: distribuție descrescătoare a frecvențelor
d) discontinuitate plană mică înclinată: distribuție periodică a frecvențelor

În cazul *tomografiei ultrasonice* se folosesc metodele numerice de formare a imaginilor dezvoltate inițial pentru *tomografia Roentgen* pentru medicină: în cazul tomografiei roentgen, piesa de examinat se găsește între sursa de radiații roentgen S_R și detectorul E. În timpul controlului se rotește fie piesa, fie dispozitivul emisie/recepție, obținându-se astfel un număr oarecare de urme de control. Considerând piesa divizată în mai multe segmente individuale, intensitatea inițială I_0 a radiației roentgen este atenuată exponențial în fiecare segment penetrat. Intensitatea I_1 recepționată de detector pe urma 1 este suma coeficienților de absorbție α_{1i} ai fiecărui segment penetrat multiplicați prin lungimea x_{1i} corespunzătoare fiecărui segment:

$$\ln \frac{I_0}{I_1} = \Sigma\, x_{1i} \cdot \alpha_{1i} \qquad (3\text{-}20)$$

Pentru n urme de control se obțin în acest mod n sisteme lineare de ecuații, care se pot rezolva numeric prin programe pe calculator. Coeficienții de absorbție astfel determinați α_{ji} ai tuturor segmentelor sunt reprezentați fie în culori, fie în nuanțe de gri și rezultă o secțiune a distribuției de materie a piesei.

În cazul tomografiei ultrasonice (fig.3-118), sursa de radiații și detectorul sunt înlocuiți prin palpatoare ultrasonice de emisie și de recepție. La receptor se măsoară deci amplitudinea ultrasonică transmisă. Relația (3-20) este corespunzător valabilă pentru *coeficienții de absorbție ultrasonică* α_{1i}. Prin această *tomografie ultrasonică prin transmisie* se obține o distribuție a coeficienților de absorbție ultrasonică ai piesei.

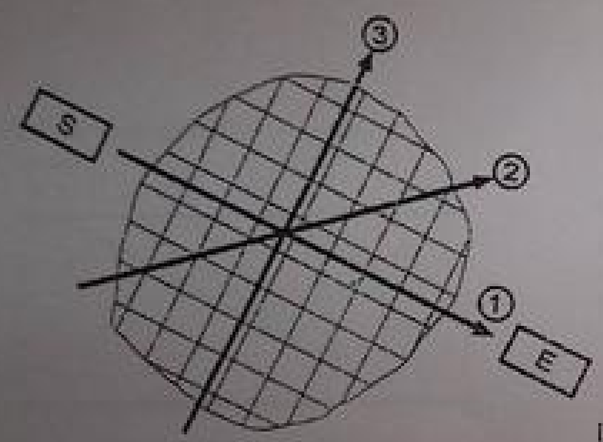


Fig. 3-118 Principiul tomografiei ultrasonice la rotirea piesei; S: emițător, E: receptor

Dacă în locul intensității se măsoară timpul de parcurs t al semnalelor transmise pe fiecare urmă de control, atunci se poate evalua timpul de parcurs sonic, în segmente individuale. După un calcul corespunzător se obține distribuția vitezei ultrasonice în piesă. *Tomografia ultrasonică prin timp de parcurs* și *tomografia prin transmisie* au puțină importanță în controlul materialelor, deoarece zonele defecte ce se pot detecta sunt de obicei astfel alcătuite încât reflectă sunetele în totalitate. În locul acesteia se utilizează *tomografia ultrasonică prin ecou*. Fig. 3-119 prezintă principiul acestei metode prin exemplul controlului unei piese cilindrice forjate[62]. Fiecare urmă de control furnizează o imagine A, din care fiecărui segment i se atașează o înălțime de ecou, corespunzând timpului aferent de parcurs. Prin rotirea piesei, segmentele sunt palpate de mai multe ori și este posibilă atașarea amplitudinii maxime de ecou sau a sumei amplitudinilor ecourilor la segmentul corespunzător. Pentru

138

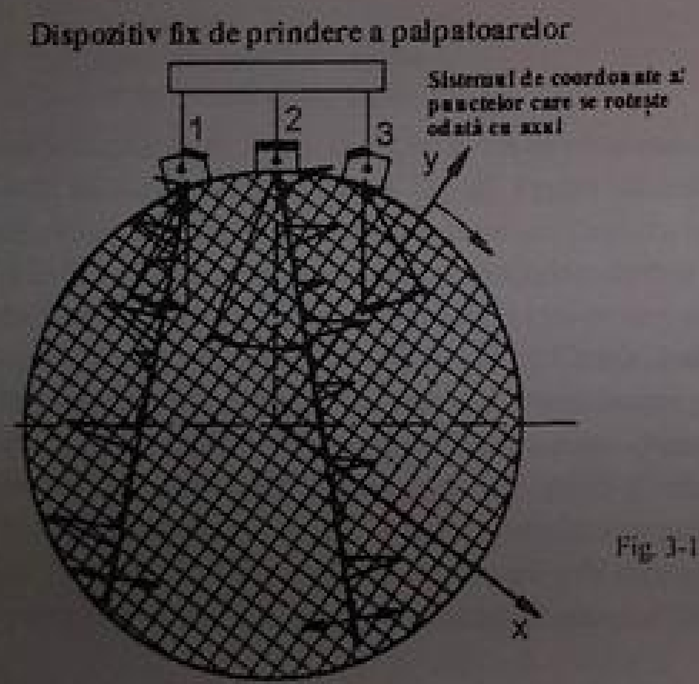


Fig. 3-119 Dispozitiv de măsurare în cazul tomografiei computerizate cu ultrasunete (după [62])

o *rezoluție* mai ridicată și o viteză mai mare de control, în principiu se pot folosi simultan mai multe palpatoare (fig.3-119) sau palpatoare emițători de grup (vezi par. 2.3.2. și fig.2-17) cu petalele ultrasonice oscilând electronic simultan. După ce a fost parcursă circumferința, palpatorul este deplasat în direcție axială. Fig.3-120 prezintă rezultatele tomografiei prin ecou, după [62], pe un ax cu diametrul de 800mm, în două straturi diferite, care conțin defecte naturale. Între structura inelară exterioară astfel formată, care prezintă marginea materialului și structura inelară interioară se găsește domeniul ecourilor de intrare, neutilizabile pentru evaluarea defectelor. Însumarea tuturor imaginilor straturilor prezintă la sfârșit și o prezentare tridimensională a întregului volum al piesei.

Literatură suplimentară - vezi [4,62,63].

Metoda ALOK (Curbe Amplitudine - Timp de parcurs - Loc) a fost inițial dezvoltată pentru automatizarea controlului recipientelor sub presiune în domeniul reactoarelor nucleare. Ea oferă, în afara unei substanțiale îmbunătățiri a raportului semnal - zgomot, posibilitatea de a descrie zonele defecte prin localizare, dimensiuni și orientare [64]. Fig. 3-121 arată în primul rând principiul de obținere a datelor prin metoda ALOK pe exemplul unui orificiu cilindric într-o piesă: palpatorul este condus pe material într-un dispozitiv automat (fig. 3-121 a). Din imaginile A aferente se determină, într-o serie densă, timpii de parcurs t_i și amplitudinile A_i ale ecourilor ultrasonice. Fig. 3-121 b prezintă operația pentru pozițiile 1 la 5 de pe material. Dacă se reprezintă timpul de parcurs și amplitudinea corespunzătoare unui defect - aici orificiul cilindric - în funcție de poziția x a palpatorului, se obțin *curba timp de parcurs - loc* și *curba amplitudine - loc* (fig. 3-121 c,d). Ecouri sporadice E_S, datorate de ex. structurii granulare, se pot deosebi în cazul reprezentării timp de parcurs - loc de curba cu alură continua corespunzătoare orificiului cilindric. Ele pot fi recunoscute printr-un algoritm de calcul adecvat și suprimate în etapele următoare de evaluare. Aceeași observație este valabilă și pentru ecourile de la marginile materialului, de ex. de la suprafața inferioară a tablei din fig 3-121 a, care se prezintă ca o linie orizontală constantă E_B pe curba timp de parcurs-loc. Valorile amplitudinii liniei nu sunt luate în considerație la

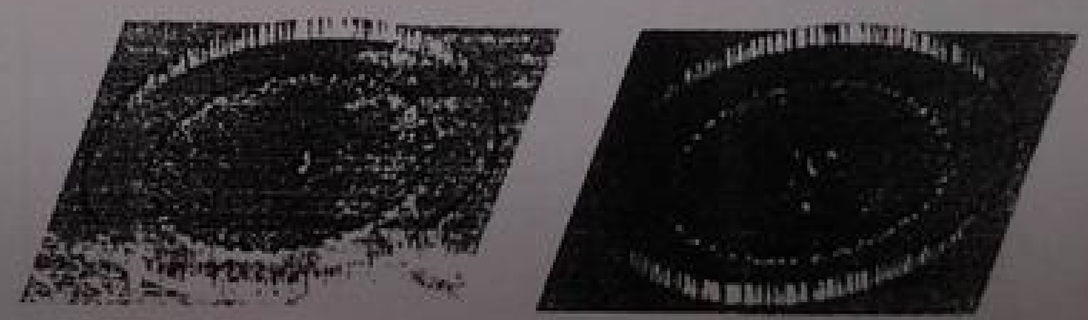


Fig. 3-120 Imagini de tomografii computerizate prin ultrasunete de la o piesă forjată (după [62])

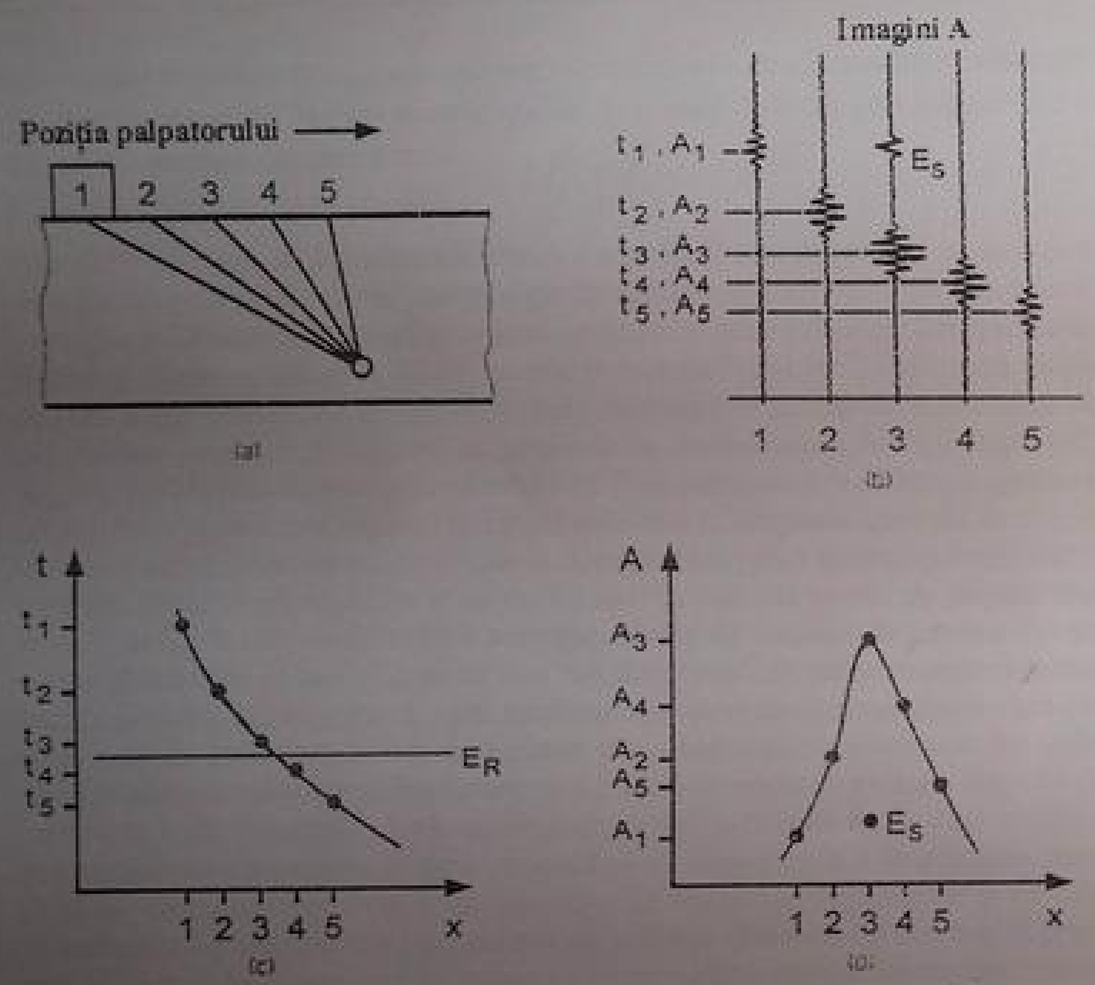


Fig. 3-121 Principiul obținerii datelor în cazul metodei ALOK (după [64])
a) palparea piesei
b) imagini A
c) curba timp parcurs - poziție
d) curba amplitudine - poziție

evaluarea ulterioară. Astfel se obține curba amplitudine-loc, eliberată de zgomote și de ecouri de formă nedorite (fig. 3-121 d). Pentru reconstituirea marginilor defectului este necesară practic doar curba timp de parcurs-loc, corespunzător curățată. Fig.3-122 ilustrează procesul de reconstituire: dintr-o poziție fixă de pe material, localizările posibile ale reflectorilor se află într-un cerc cu razele r, r' corespunzătoare timpilor de parcurs în material (fig. 3-122 b). Cercurile astfel construite pentru diferite poziții ale palpatoarelor se intersectează. Unirea tuturor punctelor de intersecție duce la o imitație a marginilor reflectorului. Pentru a putea prezenta și marginile inferioare ale reflectorilor din fig. 3-122 a, trebuie să fie evaluate și ecourile care apar între jumătatea distanței de palpare și întreaga distanță de palpare (drumurile sonice 3 și 4). În principiu pot fi reconstituite doar marginile reflectorilor la care ajunge fie palparea directă, fie palparea indirectă. În practică se utilizează adesea mai multe palpatoare și se suprapun

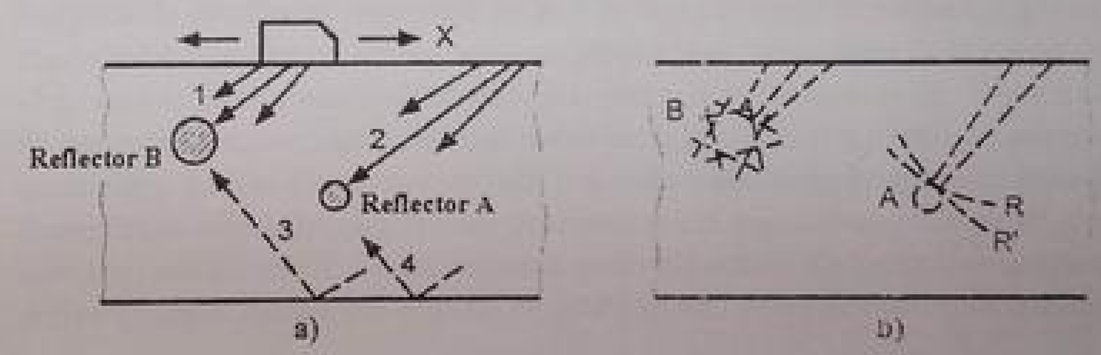


Fig. 3-122 Reconstituirea marginii reflectorului în cazul metodei ALOK (după [6])
a) palparea piesei
b) reconstituirea imaginii

reconstituirile obținute de la mai multe unghiuri și direcții de palpare, în măsura în care sunt accesibile mai multe margini ale piesei. Are aplicabilitate și tehnica tandem. Principial, reconstituirea se realizează cu atât mai bine, cu cât defectul poate fi mai uniform palpat din toate părțile.

Mai mult decât metoda însăși de reconstituire sunt și astăzi de importanță tehnică în cadrul metodelor ALOK sistemele introduse de recunoașterea semnalului și de reducerea datelor. Pornind de la faptul că semiundele redresate ale unui semnal ultrasonic sunt disponibile ca valori de amplitudine digitalizate (fig.3-123), atunci o valoare de amplitudine poate fi recunoscută ca maxim *local* în interiorul impulsului și deci interpretată și memorizată drept ecou de defect, când îndeplinește următoarea condiție: un număr de i semiunde înainte și k semiunde în spatele valorii respective trebuie să aibă valori mai mici decât maximul respectiv cu o cantitate bine stabilită. Prin aceasta se garantează o oarecare similitudine între înfășurătoarea formei cunoscute a ecoului generat de palpator și înfășurătoarea ecoului de defect care se evaluează, încât maximele locale provenind din interferențe accidentale să rămână neluate în considerație, la fel ca și zgomotul de structură. Pe de altă parte se reduce drastic cantitatea de date ce

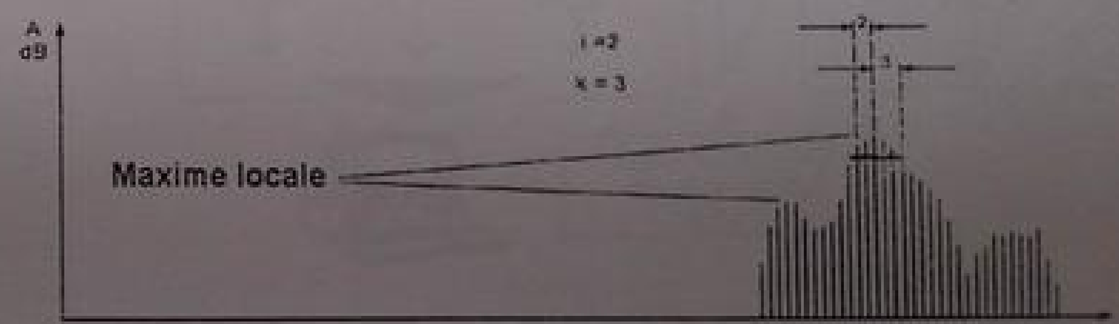


Fig. 3-123 Reducerea volumului de date prin recunoașterea maximelor locale în cadrul metodei ALOK

trebuie ulterior prelucrate. Aceasta mărește viteza de prelucrare în instalațiile automate de control și conduce, la dispozitivele mobile de control, la o reducere substanțială a capacității necesare de memorizare.

Literatură suplimentară în [65, 66].

Prin *SAFT* (Tehnica de Focalizare Sintetică a Aperturii) este desemnată metoda prin care, din imagini A preluate mai înainte, digitalizate și memorizate, se obține prin calcule o imagine B. Din cauza întârzierii provocate de timpul necesar calculelor între preluarea datelor și formarea imaginii, SAFT nu este o metodă "On-Line", chiar dacă timpii necesari astăzi pentru calcule sunt foarte mici. Metoda este aplicabilă de asemenea pe calculatoare personale în legătură cu aparatele de control manuale digitalizate [67, 68]. Fig. 3-124 prezintă principiul metodei SAFT: un palpator cu deschidere unghiulară cât mai mare posibil este deplasat în lungul unei linii L, lungimea aperturii. În timpul deplasării sunt digitalizate și memorizate în calculator imagini A la distanțe foarte scurte între ele. Ecourile provenite de la un defect apar în cele trei poziții ale palpatorului indicate în fig. 3-124, cu diferențele corespunzătoare ale timpului de parcurs. Pentru fiecare element de volum V_i al piesei sunt calculați timpii de parcurs așteptați pentru fiecare poziție a palpatorului, t_i, apoi amplitudinile de ecou corespunzătoare acestor timpi sunt căutate în imaginile A memorizate și în sfârșit valorile amplitudinilor astfel stabilite sunt însumate. Acest proces are ca urmare o compensare exactă a timpului de parcurs la locul defectului, încât ecourile de defect provenite de la toate pozițiile palpatorului sunt suprapuse în fază, conducând de asemenea la o amplitudine mare calculată corespunzător. Prin acest procedeu se realizează suplimentar și pe cale numerică același efect pe care l-ar prezenta un palpator ultrasonic tip emițător de grup, prin dirijarea cu întârziere corespunzătoare a elementelor singulare: intensitatea sonică este focalizată pe elementul de volum observat. Același efect l-ar avea un oscilator curbat, a cărui suprafață emițătoare (*apertura*) este la fel de mare cu suprafața palpată în vederea obținerii datelor în cadrul *SAFT*, mai precis suprafața de pe care se suprapun prin calcul la sfârșitul procesului imagini A. Se vorbește de aceea de o focalizare sintetică și de o apertură sintetică a palpatorului. Atașând fiecărui element de volum V_i valoarea amplitudinii obținută în acest mod, se obține o imagine B de calitate superioară. Însumarea valorilor amplitudinilor de la mai multe poziții ale palpatorului are drept urmare faptul că sunt eliminate indicațiile sporadice din zonele fără defecte ale piesei, de ex. datorită structurii, obținându-se un raport semnal-zgomot substanțial îmbunătățit. Prin palparea piesei în lungul unei linii și reconstituirea piesei în planul imaginii B (fig. 3-124), se vorbește de procedeul *LSAFT*. În general este posibilă o imagine tridimensională a piesei, prin mișcarea palpatorului pe întreaga față a acesteia și printr-un efort de calcul corespunzător mai ridicat. *Puterea de separare* a metodei *SAFT* este în principal limitată fizic de lungimea de undă. În practică, această limitare corespunde aproximativ unei jumătăți de diametru de palpator pe direcție laterală și lungimii impulsului ultrasonic utilizat pe direcție axială.

Literatură suplimentară în [69-72].

În optică, cu ajutorul *hologramelor*, obiectele sunt prezentate tridimensional. Metoda se bazează pe folosirea interferențelor dintre *unda* plană de *referință* emisă de o

sursă de lumină laser și *unda de la obiect*, reflectată de piesa ce trebuie prezentată. Imaginea de interferență imprimată pe un film fotografic este denumită hologramă. Iluminând holograma cu aceeași sursă de lumină laser, piesa apare în fața ochiului observatorului *reconstruită* ca imagine virtuală tridimensională. Principiile fundamentale ale holografiei optice se pot utiliza în principiu și la undele ultrasonice, suferă totuși limitări din cauza raportului mai nefavorabil dintre lungimea de undă și dimensiunea obiectului care trebuie prezentat și din cauza marginilor piesei și a suprafeței sale accesibile. Cu toate acestea, metodele actuale ale holografiei acustice, prin care zonele defecte din obiectul de examinat sunt prezentate de regulă uni sau

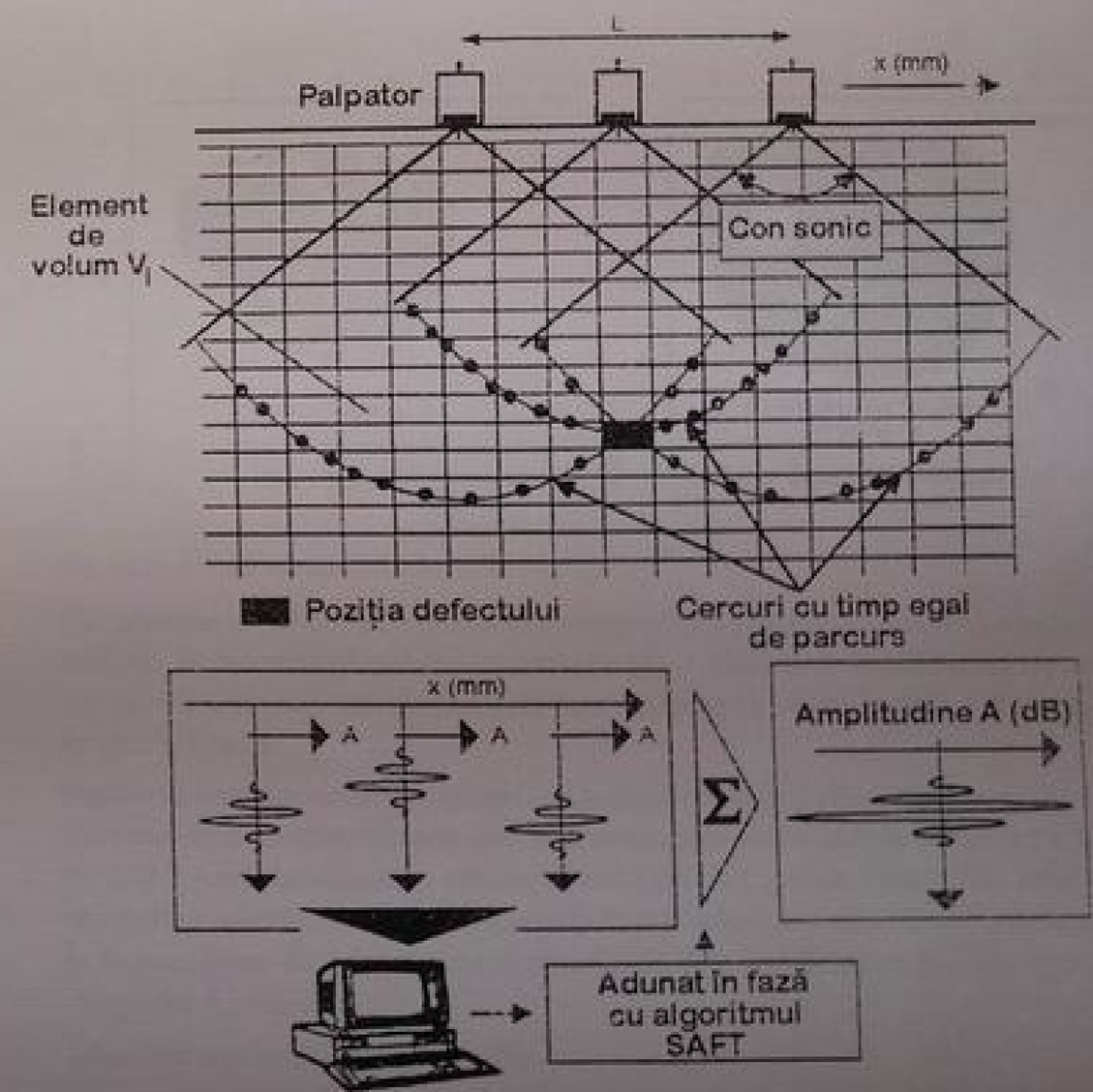


Fig. 3-124 Modul de acțiune a metodei aperturii sintetice "SAFT" (după [68])

bidimensional, reprezintă un sistem important și multiplu folosit pentru descrierea exactă a poziției, mărimii și geometriei defectelor din piesă. Principiul este prezentat în fig.3-125. Domeniul defect care este cercetat este "iluminat" cu un palpator emițător fix, cu bandă îngustă. Cu ajutorul unui dispozitiv mecanic de baleiere (*scaner*), palpatorul receptor este deplasat pe suprafața piesei în interiorul aperturii. Sunt înregistrate punct cu punct amplitudinea și faza semnalului recepționat. Pentru a înțelege reconstrucția imaginii servește faptul că drumurile sonice sunt în principiu inversabile. Considerând, în mod invers, că suprafața piesei este formată din puncte de plecare pentru undele elementare HUYGENS (vezi par. 2.3.3) cu aceleași amplitudini și faze, identice cu undele recepționate înainte de punctul respectiv al suprafeței, și suprapunând aceste unde elementare în piesă, rezultă interferență pozitivă doar în zonele reflectorilor inițiali, adică rezultă acolo o amplitudine mărită a presiunii sonice. Acest principiu este folosit pentru determinarea numerică, cu ajutorul unui calculator, a presiunii sonice inițiale în zona reflectorului și reconstruirea poziției defectului în piesă. În practică, pentru palparea piesei sunt necesare palpatoare cu deschidere unghiulară mare. De aceasta depind hotărâtor rezoluțiile laterală și axială, dar sunt limitate la mărimea lungimii de undă. De aceea este lipsită de sens micșorarea distanței planului de reconstrucție. Fig. 3-126 prezintă reconstrucția holografică a unei zone defecte într-o îmbinare sudată. Reconstrucția uzuală a amplitudinilor presiunilor sonice în planul y (fig.3-126 b) furnizează o prezentare bună a marginilor defectului (fig. 3-126 a). Altă informație, anume privind poziția înclinată a defectului față de planul de reconstrucție, este furnizată de *holografia acustică de contur*. Aici este calculată suplimentar față de amplitudine și poziția fazei undei sonice în fiecare punct din planul de reconstrucție. Diferitele poziții ale fazei corespund diferitelor distanțe până la planul de reconstrucție.

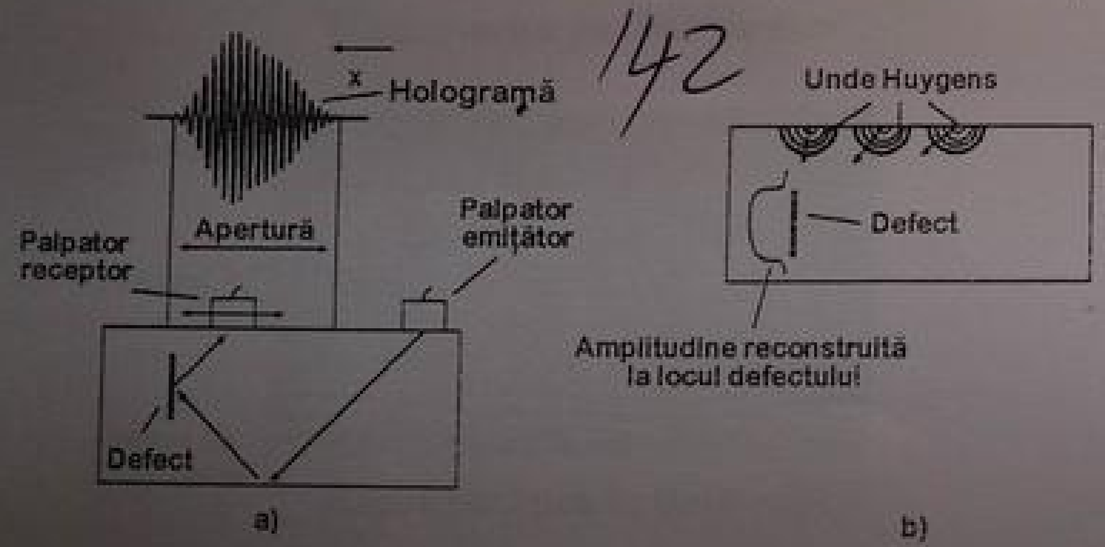


Fig. 3-125 Principiul holografiei acustice (după [73]):
a) palparea amplitudinii și fazei câmpului sonic
b) reconstrucție numerică

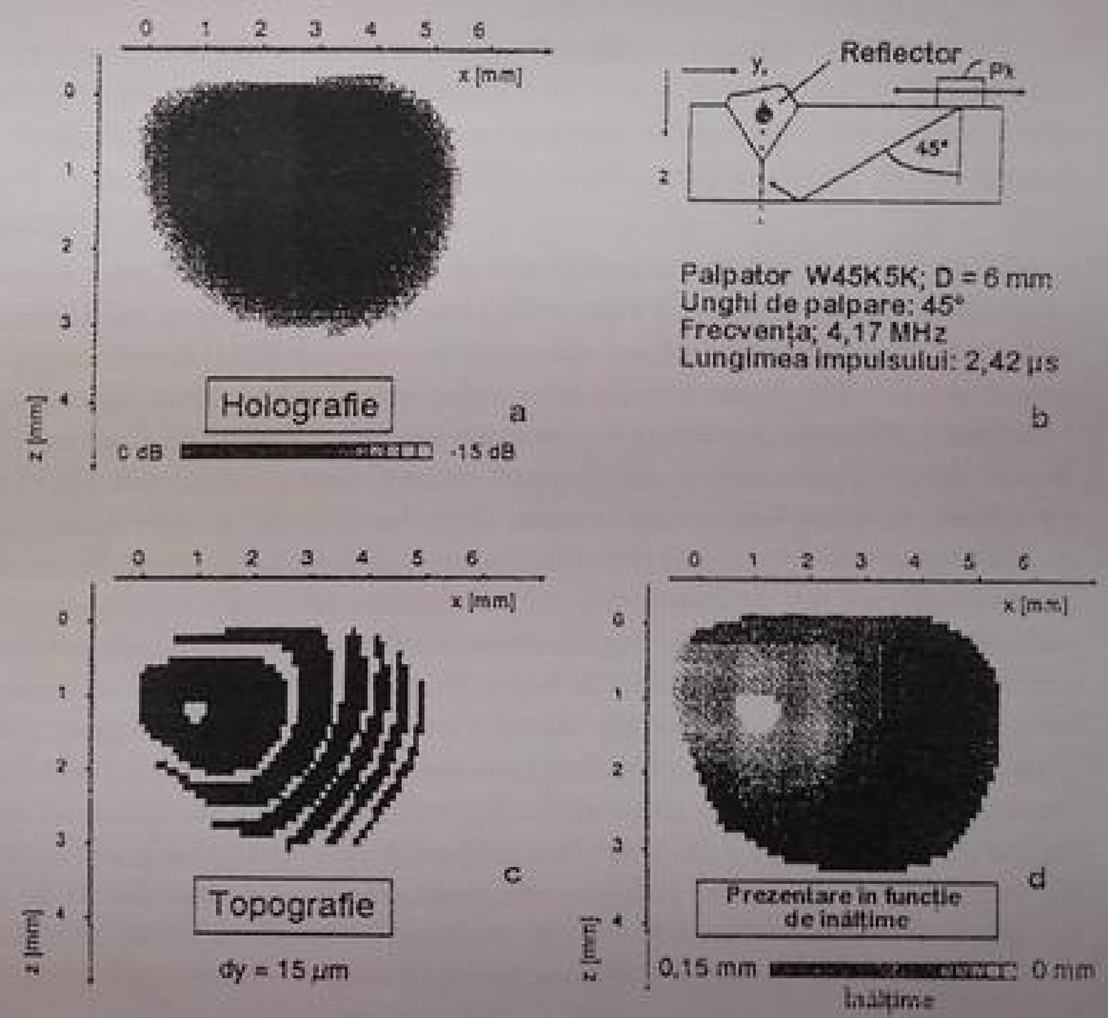


Fig. 3-126 Diferite reprezentări holografice (după [73])

Din aceastea se pot deriva o prezentare topografică a reflectorului sau o prezentare a înălțimii în raport cu planul de reconstrucție (fig 3-126 c și d). Rezoluția corespunde aici preciziei cu care este determinată faza și revine de obicei la doar o fracțiune a lungimii de undă.

Puterea de rezoluție a metodei holografice se poate îmbunătăți prin evaluarea mai multor frecvențe de examinare sau prin folosirea semnalelor ultrasonice de bandă largă. Față de SAFT, care furnizează o rezoluție înaltă privind poziția defectului, metodele holografice au avantajul că necesită o cantitate mai redusă de date, căci sunt memorizate în fiecare punct de palpare doar o pereche de date (amplitudine și fază), în locul imaginilor A complete.

Literatură suplimentară în [4, 73-76].

Una din metodele devenite practicabile prin posibilitățile aparatelor ultrasonice digitale și ale tehnicii calculatoarelor personale este tehnica difracției timpului de parcurs, cunoscută mai ales sub denumirea de *Metodă TOFD* (Time-Of-Flight-Diffraction) [77].

Ea este aplicată preponderent la controlul automat al îmbinărilor sudate (fig. 3-127). Două palpatoare unghiulare sunt așezate față în față, la distanță fixă, ca emițător și receptor, și sunt deplasate, cu ajutorul unui motor pas cu pas, în direcția x în lungul îmbinării sudate. Deschiderile unghiulare sunt așă de mari încât, la o amplificare suficientă, sunt recepționate fracțiuni din fascicul provenind din întreaga secțiune transversală. Primele fracțiuni sonice recepționate provin din secțiunea superioară din apropierea suprafeței, iar ultimele fracțiuni - din zona inferioară. Ele marchează, într-o imagine A tradițională, partea superioară și inferioară a îmbinării sudate. Ecourile care se găsesc între aceste două zone pot fi atașate unor adâncimi în material, corespunzând timpilor de parcurs.

Întreaga distribuție a ecourilor în domeniul de așteptare dintre partea superioară și cea inferioară este digitalizată și prezentată pe un ecran în trepte de gri, vertical de sus în jos. Sunt descrise în succesiune toate imaginile A provenind de la pozițiile succesive

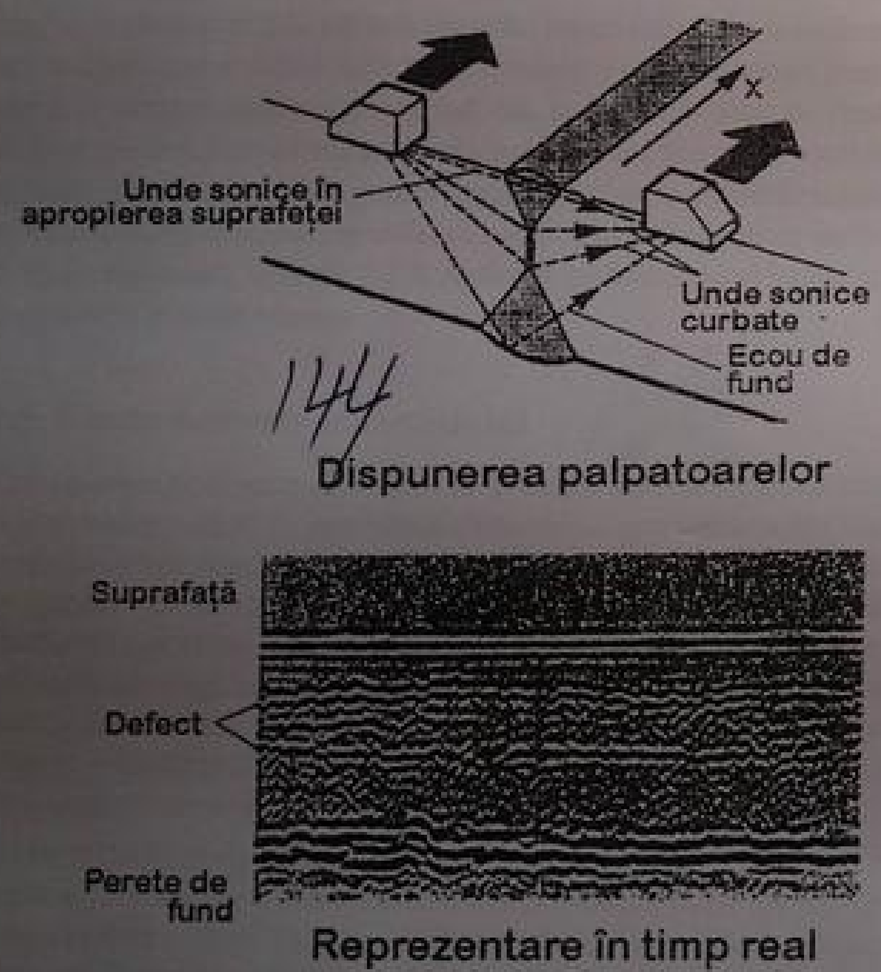


Fig. 3-127 Metoda TOFD (după [77])
a) dispunerea pentru control al unei table sudate
b) reprezentarea imaginii

ale palpatoarelor. Din această cauză, axa orizontală corespunde coordonatei în lungul îmbinării sudate. În acest mod ia naștere o imagine clară a secțiunii sudurii care este investigată (fig. 3-127b) în care defectul produce ecouri de la marginile sale prin efectul de difracție, ecouri care se evidențiază prin timpi de parcurs diferiți corespunzător și care pot fi evaluați după mărime [78].

Pentru completare să amintim aici și *microscopul acustic* (fig. 3-128). Sunetul este focalizat într-un plan din imediata apropiere a suprafeței probei care este cercetată. La o palpare într-un sistem de caroiaj, amplitudinea ecoului este codificată în valori de gri sau în culori, corespunzând poziției palpatorului, și este desenată sub forma unor imagini C (vezi par. 3.2). Inițial microscopul ultrasonic a fost conceput pentru frecvențe între 1 și 3 GHz. Puterea de separare la aceste frecvențe este similară microscoapelor clasice, cu lumină vizibilă. Spre deosebire de acestea, microscopul ultrasonic furnizează informații despre caracteristicile elastice la adâncimi stabilite. Probele nu trebuie să fie transparente. Cu ajutorul microscoapelor ultrasonice se pot executa cercetări metalografice, de ex. sunt vizualizate structurile granulare în metale sau sunt detectate microfisurile în materialele ceramice. Ecoul de reflexie este de obicei o interferență între sunetul reflectat în punctul focal al lentilei și o undă de suprafață excitată pe piesă prin conul sonic al palpatorului. Ansamblul acestor două fracțiuni sonice are adesea ca efect o amplificare a contrastului imaginii. În perioada actuală se fabrică microscoape ultrasonice și pentru frecvențe ultrasonice mult mai joase. Cu ajutorul lor se detectează și se vizualizează defectele mecanice din modulele electronice. La frecvențe sub 100MHz, pentru un dispozitiv ca cel din fig. 3-128 ar trebui totuși să fie aleasă mai degrabă denumirea de "metodă de prezentare C de rezoluție înaltă".

Literatură suplimentară în [79-82].

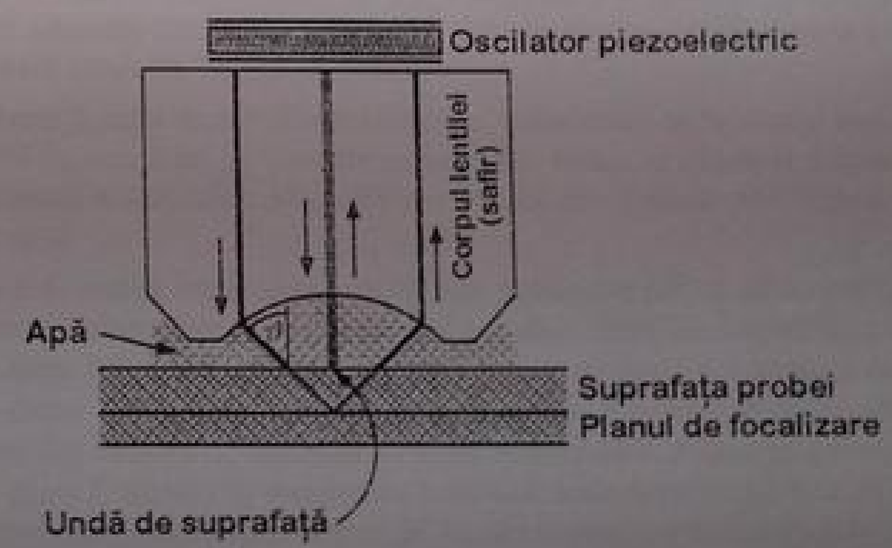


Fig. 3-128 Principiul microscopului ultrasonic

Metodele prezentate care oferă imagini pentru descrierea defectelor sunt mai mult sau mai puțin costisitoare din punct de vedere al aparaturii. Din această cauză sunt folosite industrial doar în cazuri singulare dificile. Pentru prezentarea mărimilor defectelor și poziției acestora în piesă servește de regulă, în cazul geometriei simple a pieselor metoda mai simplă cu palpare automată punct cu punct, folosind un dispozitiv adecvat și obținând o *imagine C* (vezi par. 3.2). Aparatele ultrasonice din tehnica medicală, producătoare de imagini lucrează dimpotrivă fie cu așa-numitele *scanere de sector* (acestea sunt palpatoare care se mișcă într-o parte și în alta într-o capsulă umplută cu fluid în jurul unui unghi fix, de ex. 60°, și cuprind toate neomogenitățile din interioarul unui domeniu unghiular sau *sector* existente în mediul propriu-zis de propagare), fie cu *emițători de grup* (vezi par. 2.3.2 și fig. 2-17), la care direcția fasciculului poate fi modificată electronic în orice direcție în spațiu. În comparație cu secțiunile de formă unghiulară ale imaginii în cazul scanerului de sector, cea de a doua metodă furnizează secțiuni dreptunghiulare ale imaginii. Aparatele din tehnica medicală cu producere de imagini se folosesc cu dificultate în controlul materialelor, căci la cuplarea ultrasunetelor într-un corp solid ar trebui luată în considerare o refracție sonică puternică. Cuplarea sonică pe corpuri solide este fără îndoială mai dificilă decât pe țesuturi umane sau animale, deoarece impedanța acustică a acestora este foarte apropiată de cea a apei sau a gelului, fapt ce este utilizat pentru cuplare. În plus, în corpurile solide apar la fiecare reflexie și *transformări ale modului de undă* cu diferite tipuri de undă (de ex. longitudinal și transversal), vezi par. 2.3.3. Astfel de probleme nu se întâlnesc în medicină, la diagnosticul prin ultrasunete.

3.5. Efecte datorate materialului

146

Cea mai importantă premiză pentru succesul unui control ultrasonic este aceea că piesa de controlat trebuie să fie penetrabilă ultrasonic. Capacitatea sa de a transmite sunetele se modifică însă odată cu condițiile de control. Posibilitățile de variație oferite astăzi de aparatele ultrasonice, ca și multitudinea de palpatoare au rezultat din dorința de a rezolva cât mai multe probleme de control. Capacitatea de control se exprimă prin cea mai mică neomogenitate - reprezentată de ex. printr-un defect artificial de probă cu aceleași caracteristici ultrasonice - care produce o indicație ce depășește cu minim 6dB celelalte indicații perturbatoare, care pot proveni din structura piesei de controlat sau din zgomotul electronic al defectoscopului ultrasonic (vezi par. 3.4.1).

Dacă capabilitatea de control nu poate fi atinsă cu întâiul sistem de control ales, de regulă ajută o frecvență mai scăzută și/sau un palpator cu un spectru de frecvență mai redus sau diferit. Dacă există posibilitatea alegerii între diferite palpatoare, atunci se poate stabili repede, prin încercări, dacă examinarea ultrasonică poate întradevăr să rezolve problema de control. Pentru încercări fundamentale este de ajutor și un aparat de tip CS, cu un emițător care își poate modifica continuu frecvența mediană și lățimea benzii (vezi cap. 3.2). În acest caz trebuie folosite palpatoare adecvate, de bandă largă.

După ce s-au stabilit în acest fel condițiile optime, se poate folosi iarăși un palpator cu spectrul de frecvență corespunzător, care este stimulat de un emițător de impulsuri obișnuit. Cele două situații sunt în concordanță doar dacă pătratul spectrului de emisie al sistemului CS corespunde cu spectrul palpatorului, întrucât spectrul palpatorului reprezintă produsul dintre caracteristicile de emisie și de recepție - ambele sunt aproximativ identice - în vreme ce spectrul CS se referă doar la cazul emisiei.

Structura de turnare este relativ mare, ca urmare rezultă reflexii la limita granulelor și un nivel de zgomot mai mult sau mai puțin deranjant. Acesta devine și mai puternic atunci când sunt prezente porozități.

Îmbinările sudate sunt controlate în mod preponderent cu palpatoare unghiulare. Unghiul indicat pe palpator este valabil doar pentru oțelurile feritice și se modifică odată cu modificarea vitezei sonice în material (vezi par. 3.1.1 și formula 2-22). În cazul vitezelor mai mari decât în oțel, unghiul devine mai mare, în cazul vitezelor mai mici, de ex. la plumb, cupru sau materiale plastice, unghiul se micșorează (vezi tabelul 3.2). Diagrama din fig. 3-129 oferă ajutor la aplicații practice. Folosind tălpi suplimentare sub formă de pană sau prelucrând corespunzător pana suplimentară, unghiul real din materialul respectiv poate fi adus la valoarea înscrisă pe palpator. Pentru verificarea unghiului de palpare și a calibrării aparatului se recomandă confecționarea blocurilor de etalonare K_1 și K_2 din materialele corespunzătoare. În majoritatea cazurilor, de ex. la aluminiu, magneziu sau titan, controlul se poate desfășura fără probleme, analog procedurii din cazul oțelurilor feritice [83].

Și la îmbinările sudate se întâlnesc probleme legate de materialul controlat. Capacitatea de control a unui material se înrăutățește ca urmare a procesului de topire necesar pentru sudare. Când nici materialele de bază care trebuie sudate nu sunt controlabile prin ultrasunete, atunci acest verdict este cu atât mai valabil pentru îmbinarea sudată. Pentru stabilirea capabilității de a fi examinată și a posibilei sensibilități de control sunt adecvate blocuri de calibrare cu defecte de probă, confecționate din materialele de bază și/sau din îmbinarea sudată.

Servesc în acest scop orificiile cilindrice, transversale pe fasciculul sonic și mai lungi decât lățimea acestuia, paralele cu suprafața piesei și situate la diferite adâncimi în secțiunea materialului. Alternativ pot fi practicate și canale pe cele două suprafețe ale blocului.

De o deosebită importanță tehnică sunt îmbinările sudate ale *oțelurilor austenitice*. Aceste oțeluri aliate cu crom și nichel posedă o stabilitate ridicată la coroziune și sunt de aceea folosite în instalațiile chimice și la recipientele sub presiune ale reactoarelor. În vreme ce înainte controalele erau de nevoie limitate la metoda radiografică și la controlul fisurilor de suprafață, în zilele noastre stă la dispoziție aparatură ultrasonică ce poate fi folosită la majoritatea sudurilor austenitice.Totuși încă nu este asigurată întotdeauna capabilitatea de control. Ea este adesea mai redusă decât în cazul oțelurilor feritice. Acest fapt se datorează formării unei structuri granulare mari în sudura austenitică, în care viteza sonică se deosebește de cea a materialului de bază și în plus este variabilă în direcții diferite ale structurii cristaline.

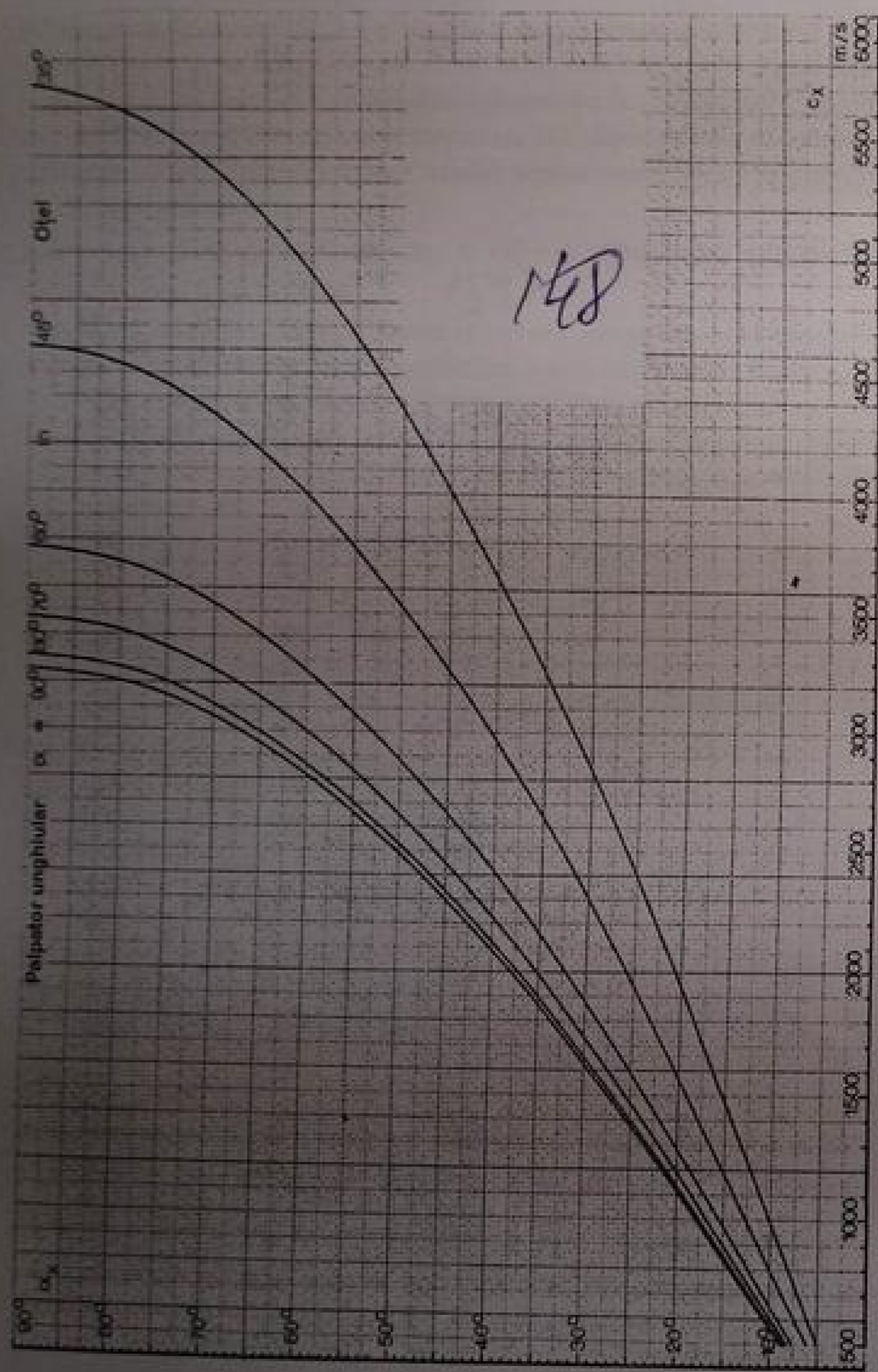


Fig.3-129 Unghiul de palpare α în materiale cu viteze sonice c_x (valabil pentru unde longitudinale și unde transversale) în cazul utilizării palpatoarelor unghiulare obișnuite pentru oțel, cu unde transversale

Dacă se folosește pentru control un palpator unghiular obișnuit, de 4 sau 2 MHz, atunci fasciculul, dacă poate ajunge până la îmbinare și înapoi, este reflectat de flancul anterior al sudurii cu granulație mare. Adesea este posibilă pătrunderea fasciculului chiar în sudură, prin alegerea unei frecvențe mai reduse. Granulația mare a acesteia produce în anumite situații așa de multe indicații de structură, încât chiar defectele de probă relativ mari nu se separă suficient din "zgomotul de structură".

S-au obținut îmbunătățiri în diferite moduri. S-a recomandat de către IIS (Institutul Internațional de Sudură) [84,85] folosirea palpatoarelor unghiulare cu unde longitudinale (fig. 3-130). Acestea produc un raport semnal-zgomot substanțial mai bun, chiar numai prin faptul că, la aceeași frecvență, lungimea de undă este mai mare decât în cazul undelor transversale și are un raport mai favorabil față de mărimea granulației.

Bineînțeles că în cazul unghiului de incidență în material al undei longitudinale cuprins între 60° și 90° (unde de fluaj pe suprafață) ia naștere, în plus, la un unghi mai mic, o undă transversală. Cu toate că este puternic absorbită, această undă poate conduce la interpretări false.

Întrucât și undele longitudinale pierd masiv energie până la reflexia pe fața opusă a materialului de bază, se poate controla cel mult până la jumătatea distanței de palpare. La amplificarea înaltă necesară, palpatoarele unghiulare cu un singur oscilator nu permit controlul zonei din apropierea suprafeței, deoarece domină reflexiile din pana suplimentară. Din acest motiv s-au inventat palpatoarele unghiulare dublu cristal

Fig. 3-130 Palpator unghiular cu unde longitudinale pentru oțeluri austenitice

(emisie-recepție) cu unde longitudinale (*palpatoare SEL*) (fig. 3-65). Întrucât ele mai și focalizează fasciculul (fig 3-4 c), este de remarcat și o sensibilitate mai ridicată de control, însă doar în domeniul specific de lucru, care este relativ îngust. De aceea, pentru un control complet al unei îmbinări austenitice de grosime mare, este necesară introducerea succesivă a mai multor palpatoare SEL. Linia valabilă de referință pentru evaluarea mărimii defectelor trebuie stabilită separat pentru fiecare palpator, folosind piesele de probă amintite.

Alte posibilități de optimizare constau în mărirea lățimii benzii spectrale, folosind palpatoare puternic amortizate. 150

Pentru o tratare completă trebuie amintit că raportul semnal-zgomot poate fi amplificat și cu ajutorul metodelor speciale de prelucrare a semnalului. Efortul este considerabil și de aceea a rămas până acum fără o mare semnificație practică. Situația s-ar putea totuși modifica, prin dezvoltarea în continuare a aparatelor de control digitalizate și prin introducerea procesorilor de semnal digitalizați. Din literatura multiplă pe această temă, numim [86-97].

Dificultăți similare cu cele de la îmbinările sudate austenitice pot apare și la controlul altor materiale, care transmit greu sunetele, de ex. plumbul.

Și *materialele termoplastice*, folosite ca trasee de conducte sudate, ridică probleme tehnice de control. Prin sudare se modifică caracteristicile acustice ale acestora. Urmarea acestui fenomen pot fi reflexia completă pe flancurile îmbinării și o absorbție

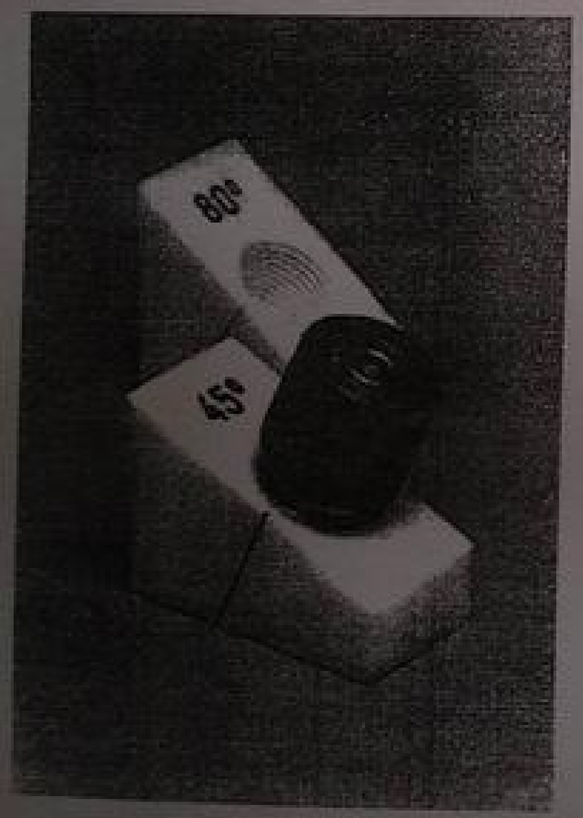


Fig. 3-131 Palpator unghiular cu unde longitudinale (palpator normal și pană suplimentară) pentru polietilenă (PE)

puternică în materialul de adaos. Și în acest caz se poate verifica capacitatea de control cu ajutorul pieselor de probă cu reflectori artificiali și cu palpatoare unghiulare speciale (fig. 3-131). Se poate întâmpla ca să nu fie posibil controlul cu tehnica prin reflexie. Atunci singura alternativă rămâne folosirea metodei prin transmisie, mult mai puțin sensibilă și mai greu de aplicat.

Dacă controlul este prevăzut sau dacă este indispensabil din motive de garanție a produsului, atunci trebuie eventual folosit un alt material, controlabil, chiar dacă este mai puțin adecvat prin proprietățile sale. La o dimensionare corectă se poate ca o îmbinare sudată controlată, confecționată dintr-un material "mai slab" să fie mai bună decât o îmbinare posibil defectă, confecționată dintr-un material "mai bun".

În tabelele următoare 3.2 până la 3.5 sunt prezentate caracteristicile acustice ale diferitelor corpuri solide, oțeluri, fluide și substanțe gazoase. Toate materialele își modifică caracteristicile acustice și deci și capacitatea de control cu temperatura. Tabelul 3.6 arată variația absorbției ultrasonice în funcție de temperatura materialului și de frecvența de control, datele fiind luate din diferite surse.

În plus, caracteristicile materialelor variază adesea și în funcție de procesul de fabricație, de compoziția chimică și de impuritățile conținute. Când este indicată doar o singură valoare, înseamnă că există doar o singură valoare măsurată. Este indicată și sursa corespunzătoare folosită. Când se precizează valori într-un domeniu, diferitele indicații sunt cuprinse în mai multe surse.